# BEOBACHTUNGEN UND MESSUNGEN AN EISHÖHLEN IM WESTERWALD UND IN DER EIFEL

Von Dr.-Ing. Albrecht Steinbach. Wiesbaden

Mit 17 Abbildungen und Diagrammen und 5 Zahlentafeln



## 1. Aufgabe und Definition

Unter den zahlreichen bekannten Höhlen zeichnen sich einige durch besondere physikalische Erscheinungen als Eishöhlen aus. Hierunter sollen alle Vereisungserscheinungen in den Höhlen und dem umgebenden Gebirge verstanden werden, die über das ganze Jahr hin andauern. Bekannt sind solche Eishöhlen besonders im Hochgebirge, so südlich Salzburg im Tennengebirge, die Dobschauer Eishöhle in Ungarn, die Beilsteinhöhle in Steiermark, im Krainer Karst, die Höhlen im Nanosgebirge und Birnbaumer Wald, die Eishöhle in Creux-Perce. Die relative Seltenheit der Eishöhlen hat ihren Grund darin, daß bestimmte geologische und meteorologische Voraussetzungen vorliegen müssen, damit sich das Eis auch im Sommer bei warmen Außentemperaturen hält. Solche Bedingungen liegen aber nicht nur im Hochgebirge vor und sind auch nicht an besonders großräumige Höhlen gebunden, sondern können auch im Mittelgebirge gegeben sein. Ausgeschlossen sind nur das eigentliche Flachland und die Küsten, wenn man von den Eishöhlen in Gletschern absieht.

Im deutschen Mittelgebirge finden sich solche Vereisungserscheinungen, die über den Sommer hin anhalten, im Westerwald und in der Eifel. Naturgemäß ist der Maßstab dieser Eishöhlen klein gegenüber den Höhlen im Hochgebirge, doch liegen die gleichen Ursachen und Erscheinungen vor, und sie sind deshalb nicht weniger interessant.

## 2. Lage und Beschreibung der Eisstollen an der Dornburg im Westerwald

Die Dornburg ist eine Bergkuppe im Westerwald nördlich Hadamar, im sogenannten Elbgrund gelegen (Abb. 1).

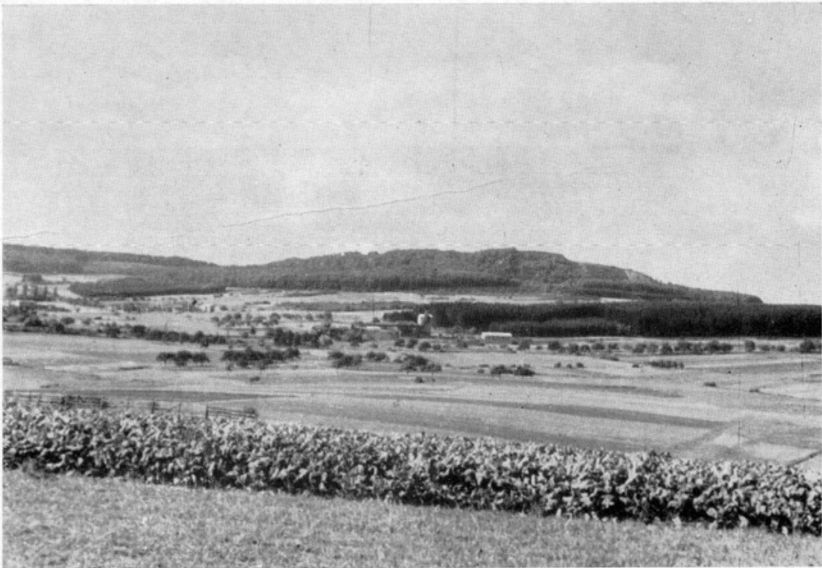


Abb. 1. Dornburg. Von Süden gesehen erhebt sich aus dem Elbgrund die bewaldete Bergkuppe, an deren Abhang, im Wald verborgen, sich die Basaltrossel mit den Eisstollen befindet.
(Photo Verfasser.)



Abb. 3. Die zwei Eisstollen an der Dornburg im Vordergrund. Im Hintergrunde steile Geröllhalde.
(Photo Verfasser.)



Abb. 5. Geröllhalde (Basaltrossel) oberhalb der Eisstollen an der Dornburg.
(Photo Verfasser.)

Diese Bergkuppe liegt zwischen den Ortschaften Frickhofen und Langendernbach, dicht bei Wilsenroth (Abb. 2).

Der Berghang hat Mischwaldbestand. Auf der flachen Kuppe mit einer Höhe von 396 m ist Wiesen- und Ackerland. Sie umfaßt eine Grundfläche von etwa 0,25 $km^2$, während der gesamte Berg eine Fläche von etwa 1,2 $km^2$ umfaßt. Der Berg erhebt sich etwa 80 m über der Ebene. In vorgeschichtlicher Zeit diente die Dornburg offenbar als Fluchtstätte, wofür noch ein Steinwall zeugt, der keltisch-germanischen Ursprunges sein dürfte und den sonst durch Steilhänge schwer zugänglichen Berg nach der einzigen weniger steilen Seite abschirmt.

Geologisch handelt es sich um Eruptivgestein mit Basaltcharakter in gerichteter Formation und in zertrümmerten Basaltblöcken von etwa Kopfgröße und etwas größer. Zwei Steinbrüche sind an dem Berg angelegt. Ihre Ausbreitung ist dadurch verhindert, daß der größte Teil des Berges einschließlich der flachen Kuppe mit dem Steinwall zum Naturschutzgebiet erklärt ist. An der Südseite des Berges finden sich in Waldlichtungen verschiedene Geröllhalden mit besonders steilem Anstieg, bedeckt mit verwitterten Basaltblöcken. Hier sind auch die Vereisungserscheinungen zu beobachten. Diese Halden haben keinen nennenswerten Bewuchs. An der in Abb. 2 bezeichneten Stelle sind zwei künstliche Eisstollen angelegt (Abb. 3) von je 1 m Breite, 2 m Länge und 1,70 m Höhe, davon 1,2 m unter der Oberfläche. Die freie äußere Öffnung beträgt je 0,5 $m^2$. In diesen Stollen bemerkt man im Sommer Schnee, der zwar langsam abschmilzt, aber die letzten Reste halten sich bis zum Eintritt kälterer Außentemperaturen im Spätherbst. Dieser Schnee ist zwar nicht in den Stollen gebildet, er wird im Winter eingeschaufelt, aber er könnte sich nicht halten, wenn der dahinterliegende Berg nicht selbst vereist wäre. Aus den Stollenöffnungen dringt im Sommer ein kalter Luftstrom nach außen; im Winter bei kalten Außentemperaturen hat die Luftgeschwindigkeit umgekehrte Richtung in den Berg hinein.

Östlich von diesen Eisstollen befindet sich ein bäuerliches Anwesen mit Restaurationsbetrieb an der Stelle, wo 1869 eine Brauerei zur Ausnutzung der Kälte errichtet wurde, wo also weitere Vereisungserscheinungen im Berg gegeben sein müssen. Ein Keller dieses Anwesens zeigt noch heute die gleichen Erscheinungen wie die Eisstollen, d. h. auch hier kommt im Sommer ein kalter Luftstrom heraus.

Südöstlich von diesem Anwesen im flachen Wiesengelände findet sich eine besonders kalte Quelle, ebenso weist der Brunnen des erwähnten Anwesens besonders tiefe Wassertemperaturen auf.

Um die Höhenverhältnisse zu veranschaulichen, ist ein Schnitt, beginnend an dem Haus an der Straße von Frickhofen nach Wilsenroth am Fuße der Dornburg bis zur höchsten Bergkuppe gelegt (Abb. 4). Über der geraden Länge von 1 km erhebt sich allmählich in verschiedenen Stufen

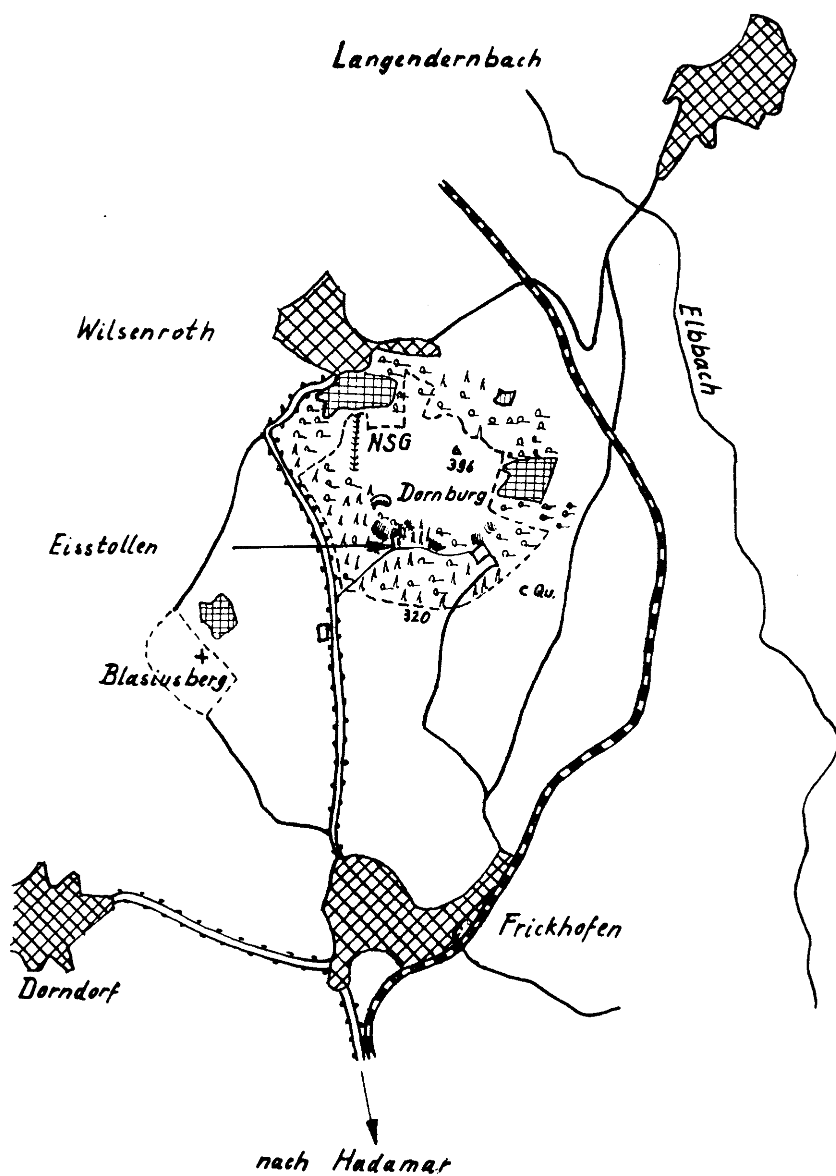



Abb. 2. Lage der Eisstollen an der Dornburg.

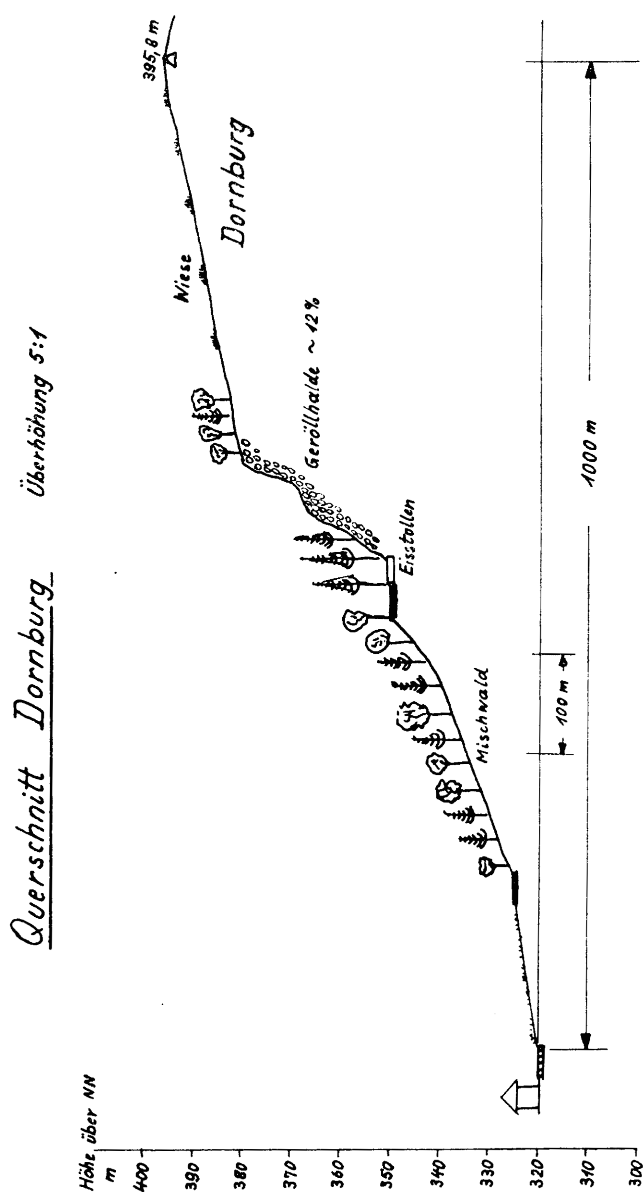



Abb. 4. Schnittskizze Dornburg mit Eisstollen.

die Dornburg, und zwar ist zur Verdeutlichung der Anstieg überhöht aufgezeichnet. Die Eisstollen mit den Vereisungserscheinungen des Berges liegen etwa auf halber Höhe am Fuße einer steilen Geröllhalde mit einer terrassenförmigen Einbuchtung. Der Anstieg beträgt etwa 12%. Die Breitenausdehnung der Halde (Abb. 5) beträgt etwa 22 m.

### 3. Bisherige Untersuchungen

Über das sogenannte ewige Eis der Dornburg sind schon früher Untersuchungen angestellt worden, und es ist darüber einiges veröffentlicht, wobei in heimatkundlichen Schriften die physikalischen Erscheinungen nicht immer richtig gedeutet wurden. Die ersten grundlegenden Untersuchungen, von denen auch alle späteren Veröffentlichungen ausgehen, sind von THOMÄ veröffentlicht worden, dessen Ergebnisse kurz folgende sind:

Im Juni 1839 entdeckte man bei der Suche nach Steinen für den Wegebau beim Graben an der Dornburg 50 bis 60 cm unter der Oberfläche Eis. Die Herzogliche Landesregierung beauftragte Oberbergrat SCHAPER und Dr. THOMÄ vom naturkundlichen Museum mit der Untersuchung. Bei Grabungen im September 1839 fand man bis 2 m Tiefe zwischen lockerem Gestein festes Eis, darunter bis zu 5 bis 6 m zwischen den Steinen gefrorenes Erdreich. Bisweilen, besonders bei tieferen Grabungen, fanden sich Eiszapfen, von der Unterseite angefrorene Steine oder rings mit einer Eisrinde umgebene Steine. Die Vereisung nahm mit weiterer Tiefe ab und hörte bei 8 m ganz auf. Irgendein nennenswerter Luftzug wurde im September nicht festgestellt.

Im Januar 1840 wurden bei Grabungen die bisherigen Ergebnisse bestätigt. In den Löchern der Grabenwandungen bemerkte man mit Kerzen einen wechselnden Luftzug. Im April 1840 stellte man einen deutlichen Luftstrom aus dem Berg heraus fest, und im Januar 1847 wurde deutlich an eng begrenzten, schneefreien Stellen höhergelegener Teile der Geröllhalde, wo auch Spalten im Gebirge sichtbar waren, ein warmer Luftstrom aus dem Berg heraus beobachtet, dessen Temperatur über der der Außenluft lag.

An drei Wasserquellen am Fuße der Dornburg wurde eine über das Jahr hinweg ziemlich gleichmäßige Wassertemperatur zwischen 5 und 6° C gemessen.

THOMÄ kommt zu der richtigen Deutung, daß der Berg im Innern zur Winterszeit durch die einströmende kalte Luft soweit vereist, daß er im Sommer nicht wieder vollständig abschmilzt. Diese Erklärung konnte bei den jetzt durchgeführten Untersuchungen mit besseren Hilfsmitteln, als sie THOMÄ zur Verfügung standen, bestätigt werden, worüber weiter unten berichtet wird.

Rätselhaft blieb THOMÄ nur die Tatsache, daß die im Winter unten in den Berg einströmende Luft konstant —3° R zeigte.

Von populären Autoren oder solchen, die keine eigenen Messungen durchgeführt haben, sind später wiederholt über Entstehung und Erhaltung der sommerlichen Vereisung Ansichten vertreten worden, die nicht ganz stichhaltig sind. So hat man gemeint, daß sich das Eis auch im Sommer neu bilde, in den wärmeren Jahreszeiten besonders stark, daß die wechselnde Strahlung von Tag und Nacht und die Strahlung zwischen Eis und Stein die Eisbildung begünstige, daß chemische Wirkungen der Salzlösung hierbei mitspielen, daß der im Inneren des Berges vermutete Magneteisenstein für die Eisbildung verantwortlich sei, daß es sich um verschüttetes Eis aus der Eiszeit handele, und schließlich, daß die Verdunstungswirkungen in Verbindung mit der Luftströmung die Eisbildung fördern. Auf einige dieser Punkte wird weiter unten noch eingegangen.

1869/70 wurde nun von TROOST, der als Besitzer 1873 hierüber berichtet, eine Brauerei errichtet, die mit der natürlichen Kälte ihre Lagerkeller auf 0° C, das Kühlschiff auf 1 bis 3° C, den Malzkeller auf 4 bis 6° C halten konnte und den Gärkeller sogar heizen mußte, um das auf Gärung stehende Bier nicht zu stark abzukühlen. Der Brunnen lieferte weiches Wasser von 3° C. Nach 17jährigem Betrieb brannte die Brauerei ab und wurde als solche nicht wieder errichtet. Einen Teil der Keller benutzt jetzt die hier betriebene Gastwirtschaft als Aufbewahrungsraum.

### 4. Untersuchungsmethoden

Im Naturschutzgebiet dürfen keine Grabungen vorgenommen werden. Mit den heute zur Verfügung stehenden Instrumenten kann man jedoch auch ohne Grabungen die Vereisungserscheinungen nachweisen. THOMÄ benutzte lediglich Thermometer und Kerzen.

Um die fraglichen Verdunstungserscheinungen zu beurteilen, wurde ein ASSMANNsches Aspirations-Psychrometer verwendet und die Luftgeschwindigkeit nach Größe und Richtung durch ein Spezialinstrument, wie es im Bergbau üblich ist, einen Gothemesser, festgestellt. Die Untersuchungsstellen sind in Abbildung 6 gekennzeichnet. Es wurden zunächst viele Meßstellen vorgesehen, später nur die charakteristischen. Die Zeichnung gibt eine Darstellung im Grundriß links unten, Aufriß links oben und Seitenriß als Schnitt durch den Berg rechts oben. Über den Eisstollen erhebt sich die Geröllhalde mit ihrem terrassenförmigen Charakter. Meßstellen sind I und II: die beiden Eisstollen.

a, d, e, f, g sind Meßpunkte an charakteristischen Kanalöffnungen im Geröll des Berges (wenn in den folgenden Meßergebnissen Werte der Luftgeschwindigkeit eingeklammert sind, so handelt es sich um Werte außerhalb der Kanalöffnungen).

b, h, i, k sind Meßpunkte der Außenluft (Wetter).

Der Wert b' bedeutet Messungen an verschiedenen Punkten in 2 bis 6 m Entfernung um die Eisstollen herum (Tafel 2—5).

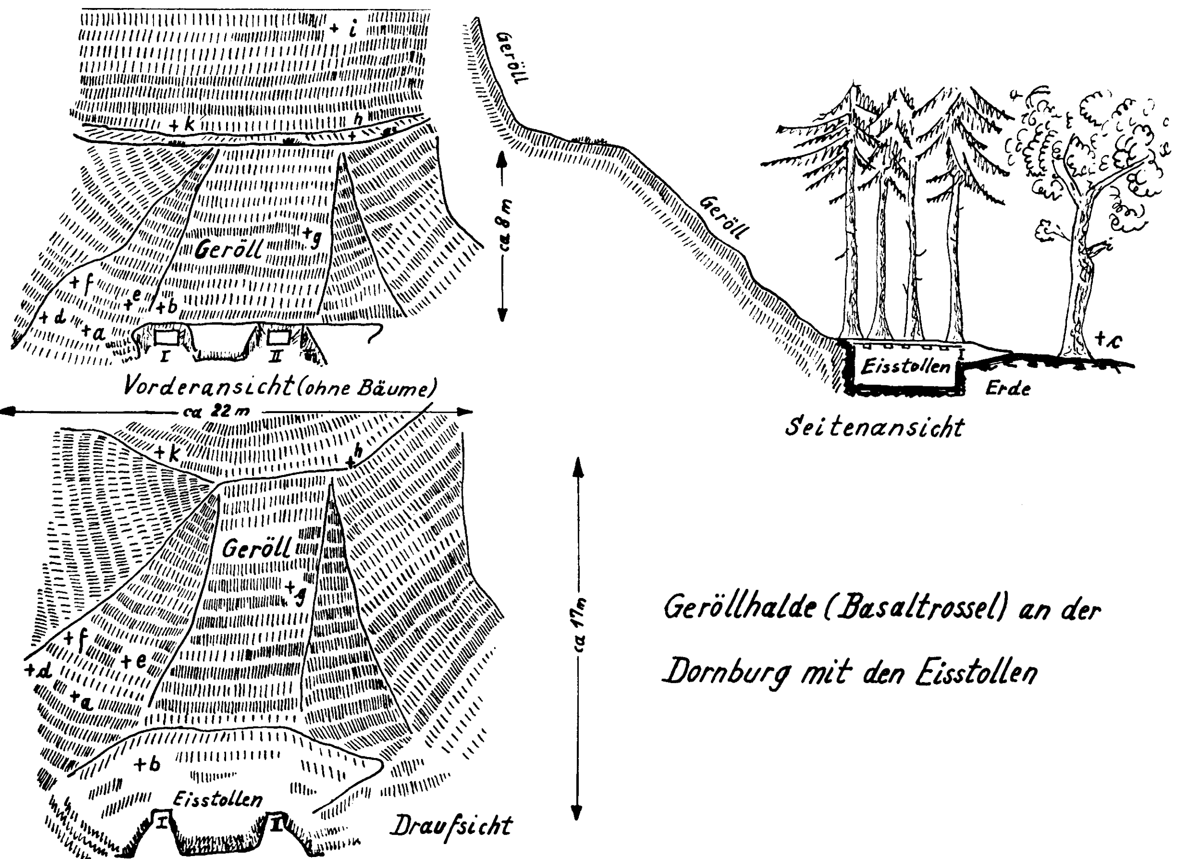



Abb. 6. Skizze der Geröllhalde mit den Eisstollen der Dornburg und den Meßpunkten.

Teilweise wurden bei gleichartigen Ergebnissen Mittelwerte gebildet, so z. B. bedeutet $M_{hik}$ Mittelwert der Meßpunkte h, i und k (Tafel 2—4).

WWH sind Messungen am sogenannten Wildweiberhäuschen, einer Felsgruppe oberhalb des ländlichen Anwesens, wo 1847 der Austritt warmer Luft und das Abschmelzen der Schneedecke beobachtet wurden. Kellermessungen beziehen sich auf die ehemaligen Bierkeller des ländlichen Anwesens.

Die Meßwerte sind in den Zahlentafeln 1—5 (am Schluß) niedergelegt.

## 5. Täglicher Verlauf der Meßwerte im Sommer

Zur Übersichtlichkeit wurden die charakteristischen Werte des täglichen Verlaufes vom 2. bis 3. August 1952 graphisch aufgetragen, wobei sich diese meteorologischen Daten also über einen Zeitraum von etwa 24 Stunden erstrecken (Abb. 7). In mehrstündigen Abständen wurden die verzeichneten Ablesungen gemacht, wobei der Barometerstand 726 bis 729 mm betrug (Tafel 2 und 3).

Die Luftgeschwindigkeit w an den Eisstollen (I, II) liegt fast konstant bei einem Mittelwert von 0,9 m/s. Sie wird weder von den stark schwankenden Außentemperaturen (siehe z. B. $t_b$ und $t_{hik}$) noch von der relativen Feuchtigkeit der Außenluft ($\varphi_b$) nennenswert beeinflußt. Das ist damit zu erklären, daß die Temperaturunterschiede zwischen Tag und Nacht die Wichte der Luft nur um $3\frac{1}{2}\%$ ändern, so daß die Kaminwirkung des Berges nicht meßbar beeinflußt wird, denn um eine solche handelt es sich als Ursache der Luftströmung. Die etwa 3° C betragende Austrittstemperatur der Luft ($t_{I,\ II}$) hat eine größere Wichte als die wärmere Außenluft. Dadurch kommt der Luftstrom zustande, ähnlich wie im Sommer in den Wohnungen der Kamin umgekehrt zieht, weil es in den Zimmern kälter als auf dem Dach ist. Die Luftaustrittsgeschwindigkeit an den einzelnen Kanalöffnungen d, e, f, g wechselte zwischen 0,0 und 0,9 m/s.

Die Temperatur der aus den Stollen austretenden Luft bleibt über den Tagesverlauf annähernd konstant. Auch sie wird nicht durch die äußeren Wetterbedingungen beeinflußt. Hieraus folgt, daß die Austrittstemperatur letztlich durch die Verhältnisse bedingt ist, die beim Vorbeistreichen der Luft im Innern des Berges an dem dort vorhandenen Eis sich einstellen. Eintrittsstellen für die Luft muß es am Berg an vielen Stellen geben, sie konnten jedoch nicht unmittelbar gemessen oder nachgewiesen werden.

Die äußeren atmosphärischen Verhältnisse zeigen nachts eine auf 14 bis 15° C sinkende Temperatur in der Nähe der Eisstollen ($t_b$) und auch in den höher gelegenen Punkten ($t_{hik}$), wobei ein Mittel aus 3 Meßwerten gezogen ist. Zu der Temperatur des trockenen Thermometers $t_b$ wurde auch die Temperatur des feuchten Thermometers $t_b'$ aufgetragen. Aus diesen beiden Werten ergibt sich die relative Feuchtigkeit $\varphi_b$. Sie steigt bei der sinkenden Nachttemperatur bemerkenswert an, während $t_b'$ eine leicht

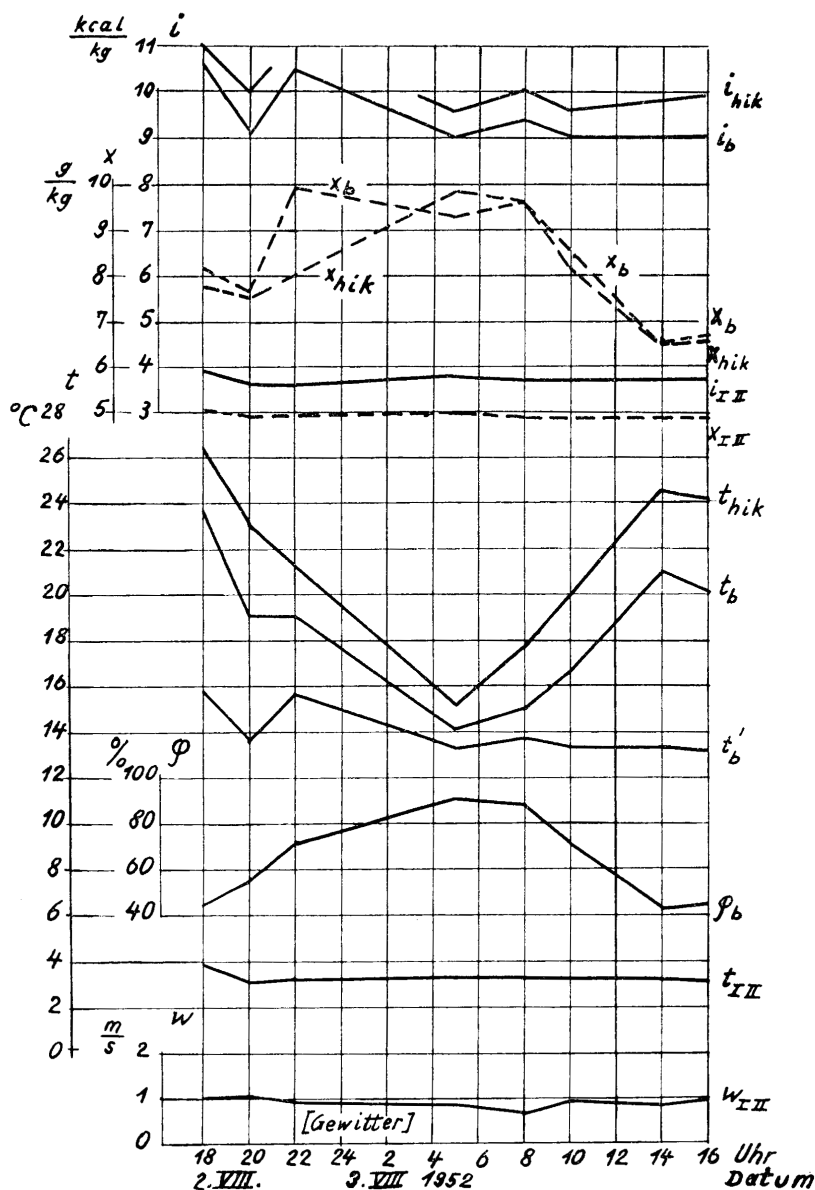
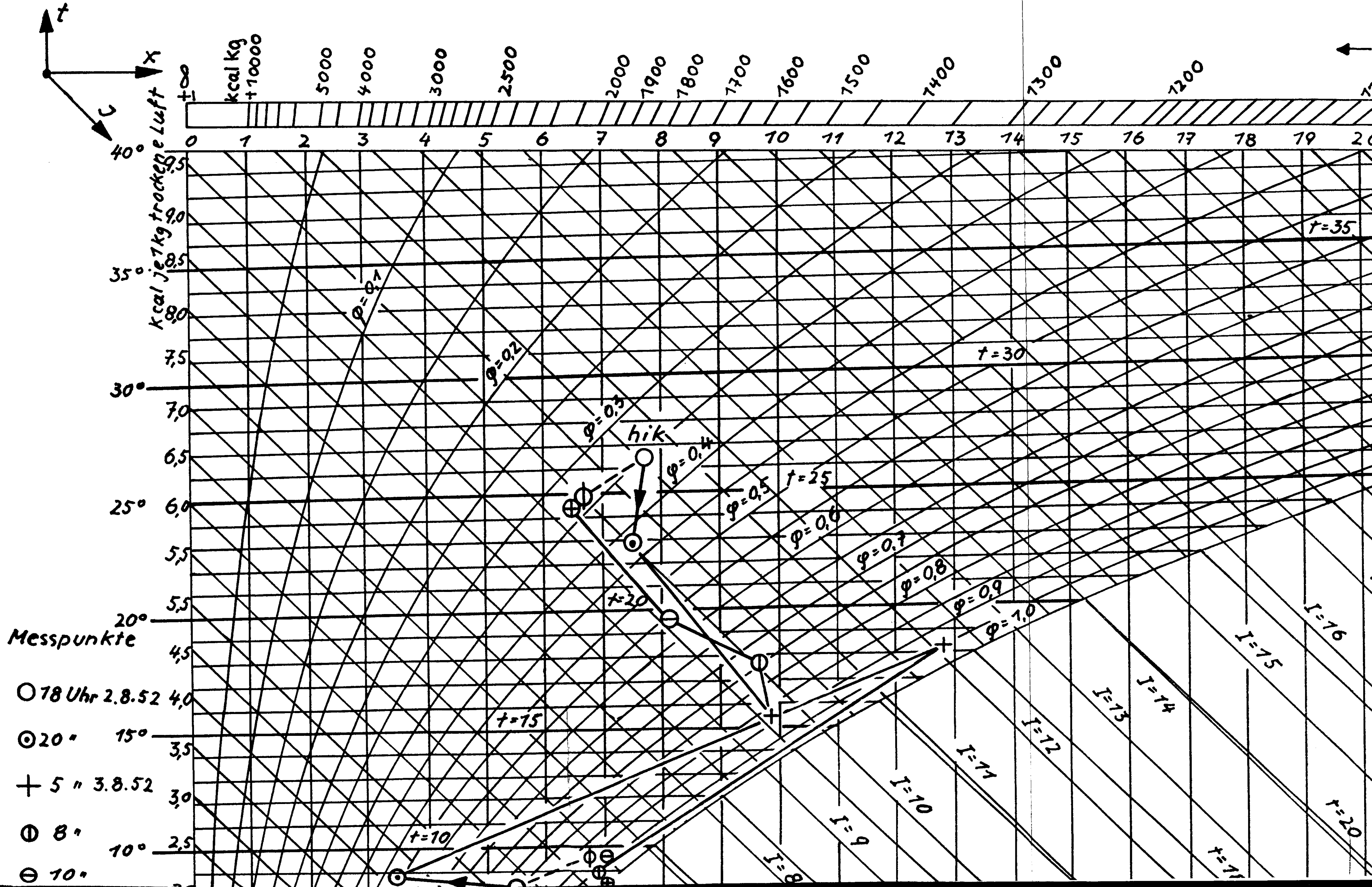
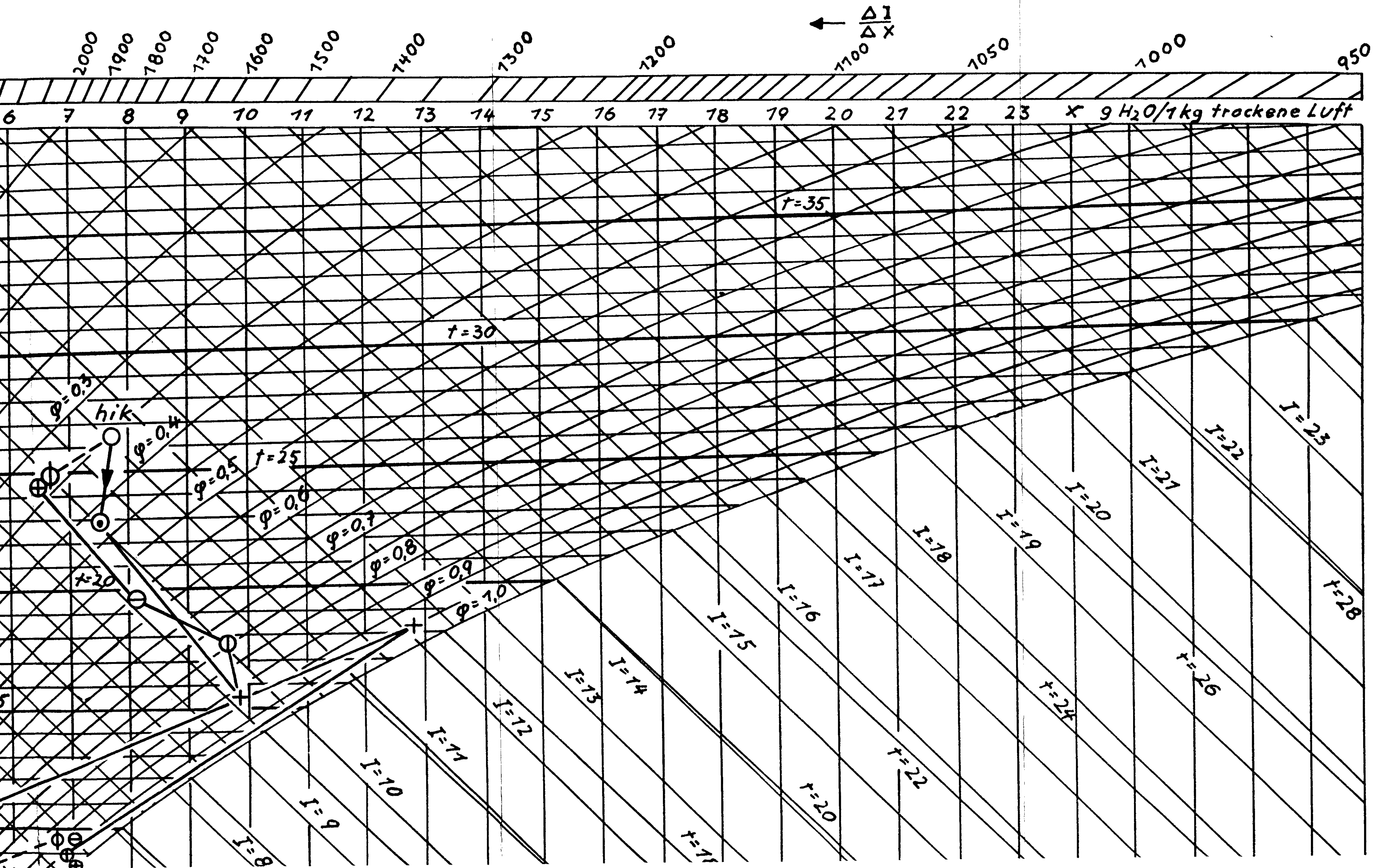



Abb. 7. Messungen Dornburg 1952: Täglicher Verlauf



t
x
c
kcal kg
+10000
5000
4000
3000
2500
2000
1900
1800
1700
1600
1500
1400
1300
1200
kcal je 1 kg trockene Luft
40°
35°
30°
25°
20°
15°
10°
φ = 0,1
φ = 0,2
φ = 0,3
φ = 0,4
φ = 0,5
φ = 0,6
φ = 0,7
φ = 0,8
φ = 0,9
φ = 1,0
t = 10
t = 15
t = 20
t = 25
t = 30
t = 35
hik
I = 9
I = 10
I = 11
I = 12
I = 13
I = 14
I = 15
I = 16
Messpunkte
○ 18 Uhr 2.8.52
⊙ 20 "
+ 5 " 3.8.52
⦶ 8 "
⊖ 10 "



ΔI / Δx
2000
1900
1800
1700
1600
1500
1400
1300
1200
1100
1050
1000
950
6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23
x g H₂O/1 kg trockene Luft
t=35
t=30
t=25
t=20
φ=0,3
φ=0,4
φ=0,5
φ=0,6
φ=0,7
φ=0,8
φ=0,9
φ=1,0
hik
I=8
I=9
I=10
I=11
I=12
I=13
I=14
I=15
I=16
I=17
I=18
I=19
I=20
I=21
I=22
I=23
t=20
t=22
t=24
t=26
t=28

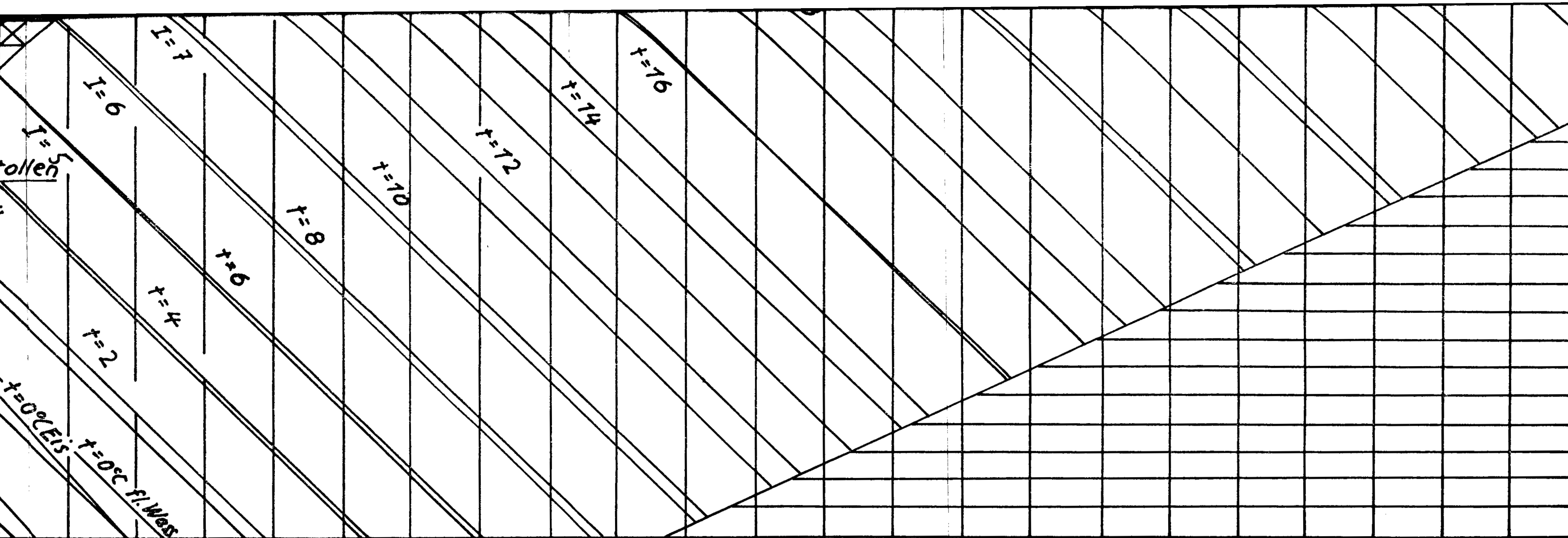



Abb. 9. Ausschnitt J-x-Diagramm feuchter Luft im Temperaturbereich von + 40° C ÷ —30° C (h = 735,5 mm)
Messungen Dornburg 2./3. 8. 1952.

Φ 16"

5°
t
I
1,5
1,0
0,5
0°
0
-0,5
-1,0
-5°
-1,5
-2,0
-10°
-2,5
t= 5
t=0
I II
Eis stollen
Eis
I=0
I=1
I=2
I=3
I=4
I=5
I=6
t=0°C Eis
t=0°C fl. Wass
t=2
t=4
t=6
t=8
t=10
t=12
t=14
t=16

Abb. 9. Ausschnitt J-x-Diagramm feuchter Luft im Temperaturbereich von + 40° C ÷ —30° C (h = 735,5 mm)
Messungen Dornburg 2./3. 8. 1952.

abfallende Tendenz aufweist. Daraus folgt, daß der Wärmeinhalt der Außenluft $i_b$ und $i_{hik}$ sich über diesen Tagesverlauf trotz eines nächtlichen Gewitters mit leichtem Regen nicht nennenswert geändert hat. Im Wärmehaushalt der Außenluft tritt daher keine große Änderung ein. Das ist auch nicht zu erwarten, und es findet sich auch kein Hinweis dafür, daß die Verdunstungsverhältnisse am Tage und in der Nacht sich sehr unterscheiden.

Unter dem Wärmeinhalt versteht man bekanntlich die bei einer bestimmten Temperatur und Feuchtigkeit und einem vorliegenden Barometerstand auf 1 kg trockene Luft bezogene Wärmemenge in kcal. Formelmäßig heißt das

$$i = 0{,}241 \cdot t + \frac{\varphi \cdot h_s}{B - \varphi \cdot h_s} (370 + 0{,}286 \cdot t)$$

Hierbei bedeutet t° C die jeweilige Temperatur, $\varphi$ % die relative Feuchtigkeit, $h_s$ mm Hg den zur Temperatur gehörigen Wasserdampfteildruck im Sättigungszustand, B mm Hg den Barometerstand.

Zu beachten ist, daß die relative Feuchtigkeit

$$\varphi = \frac{h}{h_s} \text{ ist,}$$

wobei h den effektiven Wasserdampfteildruck und $h_s$ den Sättigungswert des Wasserdampfteildruckes bedeuten, jeweils naturgemäß für dieselbe Temperatur.

Der absolute Wassergehalt, der auch in Abbildung 7 dargestellt ist, wird in g/kg ermittelt und errechnet sich aus

$$x = 0{,}622 \frac{\varphi \cdot h}{B - \varphi \cdot h_s} \cdot 1000,$$

ebenfalls auf 1 kg trockene Luft bezogen.

Die beiden Werte i und x sind in der Klima- und Kältetechnik von Bedeutung und können für die Beurteilung der Vorgänge in dem vereisten Berg herangezogen werden. Es ist zweckmäßiger, mit diesen Werten zu rechnen, als mit den Temperaturen und Feuchtigkeiten. Nur wenn eine effektive Änderung des Wärmeinhaltes i vorliegt, findet ein echter Wärmefluß statt. Wie aus Abbildung 7 hervorgeht, ändert sich der Wärmeinhalt der Außenluft ($i_b$ und $i_{hik}$) über den Tagesverlauf hin nur wenig. Aus der Tatsache, daß aber Temperatur und Feuchtigkeit stark schwanken, muß man schließen, daß es sich wegen des konstanten Wärmeinhaltes um einen inneren Vorgang der Luft handelt. Bei ansteigender Feuchtigkeit wird Wasserdampf aus der feuchten Erdoberfläche aufgenommen, dessen Wärmeinhalt aber die Abkühlung der Luft ausgleicht. Ein ähnlicher Vorgang spielt sich ja am feuchten Thermometer des Psychrometers ab. Diese Verdunstungserscheinungen der Außenluft sind nicht durch den Berg und dessen Vereisung beeinflußt, sondern ein natürlicher Vorgang, der sich

überall abspielen kann. Das leichte Absinken des Wärmeinhaltes über den Tag hin ist durch eine allgemeine Senkung der Lufttemperatur in Verbindung mit dem nächtlichen Gewitter zu erklären.

Auch der Wärmeinhalt der aus den Eisstollen austretenden Luft $i_{I,\ II}$ ist nur geringen Schwankungen unterworfen, aber aus anderen Gründen, als es eben für die Verdunstung der Außenluft erörtert wurde. Die aus den Eisstollen austretende Luft ändert sich in ihrer Temperatur $t_{I,\ II}$ nur wenig, und gleichzeitig liegt die relative Feuchtigkeit dauernd bei etwa 100%. Wenn sich also Temperatur und Feuchtigkeit nicht ändern, bleibt der Wärmeinhalt an dieser Stelle konstant.

Wie aber ersichtlich, liegt der Wert des Wärmeinhaltes der austretenden Luft wesentlich unter dem Wert der Außenluft. Hieraus folgt, daß also dauernd, und zwar wenig wechselnd, während des ganzen Tages eine Wärmeabgabe der in den Berg eingesaugten Luft an das Berginnere stattfindet. Damit ist zwar noch nicht belegt, daß diese Wärmeabgabe auch an das Eis erfolgt. Es könnte sich ja, und solches ist schon behauptet worden, auch um eine Verdunstungswirkung der eingesaugten Luft in dem lockeren Geröll handeln. Dem widerspricht aber nun ein physikalisches Gesetz, das eine Abkühlung durch Verdunstungswirkung allein bei einer gegebenen Ausgangstemperatur und Ausgangsfeuchtigkeit nur bis zu einem bestimmten Wert, der sogenannten Kühlgrenze, möglich ist. Diese Kühlgrenze ist ein Wert, der nahe, und zwar wenig über der Temperatur des feuchten Thermometers liegt. Dieser Wert $t_b'$ liegt nun während des ganzen Tages zwischen etwa 15 und 13° C. Eine weitere Abkühlung allein durch Verdunstung unter diesem Wert ist physikalisch gar nicht möglich. Demnach muß im Berg eine Kältequelle vorhanden sein, sonst könnte eine Temperatursenkung der durch den Berg strömenden Luft auf 3° C nicht möglich sein. Der wenige Schnee in den Eisstollen kann diese Abkühlung auch nicht hervorrufen, denn er wäre bei der immerhin beträchtlichen Wärmeabgabe der Luft längst geschmolzen. Das Eis muß vielmehr in größerer Mächtigkeit im Berg vorhanden sein, wie es ja THOMÄ durch seine Grabungen unmittelbar nachgewiesen hat. Die Kühlwirkung des Berginhaltes auf die durchströmende Luft ist naturgemäß nur dadurch möglich, daß ein Teil der bestrichenen Eisfläche dauernd abschmilzt. Das Schmelzwasser geht teilweise in das Grundwasser, vermischt sich teilweise mit dem Niederschlagswasser und bewirkt somit die tiefen Brunnen- und Quellwassertemperaturen.

Der absolute Wassergehalt der Außenluft $x_b$ und $x_{hik}$ liegt ebenfalls höher als derWassergehalt der aus den Eisstollen austretenden Luft $x_{I,\ II}$, d. h. es findet dauernd eine Wasserabgabe der atmosphärischen Außenluft an den Berg statt. Diese Wasserabgabe versickert zusammen mit dem Schmelzwasser im Boden. Der Brunnen des ländlichen Anwesens zeigte eine Temperatur von 6° C und das Quellwasser hatte etwa die gleiche Temperatur. Da bekanntlich die natürliche Bodenwärme bis zu 25 m Tiefe

etwa 9° C beträgt und von da aus ansteigt, sind die niedrigen Wassertemperaturen nur dadurch zu erklären, daß es sich um den Einfluß des Schmelz- und Niederschlagwassers handelt.

Über den Tageslauf hin ändert sich also, wenn man den gesamten Wärmehaushalt betrachtet, nur wenig. Es ist also auch nicht erwiesen, daß etwa nachts infolge stärkerer Verdunstung ein Wachsen der Vereisung möglich ist. Daß der in die Eisstollen eingeschaufelte Schnee sich fast über das ganze Jahr hin hält, findet seine Erklärung darin, daß die hier durchstreichende Luft sich an dem vereisten Berginnern bis auf 0° C abgekühlt und nur an den Meßstellen beim Austritt aus den Stollen sich schon wieder etwas erwärmt hat.

An den übrigen Luftaustrittsstellen des Berges oberhalb der Stollen, insbesondere bei d, e, f und g wurden ebenfalls die Temperaturen und Geschwindigkeiten der austretenden Luft gemessen. Auch diese Werte liegen noch unterhalb der Kühlgrenze, wenn auch die Temperaturen etwas über denen am Eisstollen liegen. Es tritt also in den oberen Steinschichten zunächst auch eine Abkühlung durch Verdunstungswirkung ein, aber auch schon eine teilweise Kühlung durch die Kältequelle im Innern des Berges. Die einzelnen Meßwerte schwanken stark, was auf Zufälligkeiten der Luftströme zurückzuführen sein mag, in der Hauptsache liegen sie zwischen 6 und 11° C.

Man hat sich also physikalisch den Vorgang im Berg folgendermaßen vorzustellen: Die an vielen, im einzelnen nicht zu lokalisierenden Stellen in den Berg oben eingesaugte Luft kühlt sich zunächst durch Verdunstungswirkung ab, wobei die Kühlgrenze den tiefst erreichbaren Wert darstellt. Hierbei nimmt die Luft Wasserdampf aus dem feuchten Gestein auf, das durch diese kalte Luftströmung selbst auf etwas niedrigerer Temperatur gehalten wird. Diese eisfreie Geröllschicht wirkt als Isoliermantel und schützt das darunterliegende mit Geröll vermengte Eis vor der direkten Wärmeaufnahme infolge der Sonnenbestrahlung. Ein Teil der eingesaugten Luft kühlt sich bei Erreichen der Eisgrenze erheblich unter die Kühlgrenze ab, wird schwerer und drückt sich nach unten an der tiefsten Stelle der Eisstollen aus dem Berg heraus, zum Teil auch durch Kanäle etwas weiter oberhalb, und kühlt hier besonders intensiv die isolierende Geröllschicht ab. Ohne die schützende kalte Geröllschicht über dem Eis wäre eine so lange Haltbarkeit über den Sommer hinweg nicht möglich, selbst wenn man die von Thomä gefundene Mächtigkeit von 8 m gefrorenem Boden annimmt.

In Abbildung 8 sind über den täglichen Verlauf die Größen der Wärmeabgabe $\Delta_i$ und der Wasserabgabe $\Delta_x$ dargestellt, wobei von den äußeren Luftverhältnissen ausgegangen ist und die Werte jeweils für die einzelnen Meßpunkte I und II, e, f und g erfaßt sind. Es zeigt sich, daß die Wärmeabgabe bis zum Austritt aus den Eisstollen am größten ist und an den Luftaustrittsstellen e, f, g oberhalb der Eisstollen etwas geringer. In den

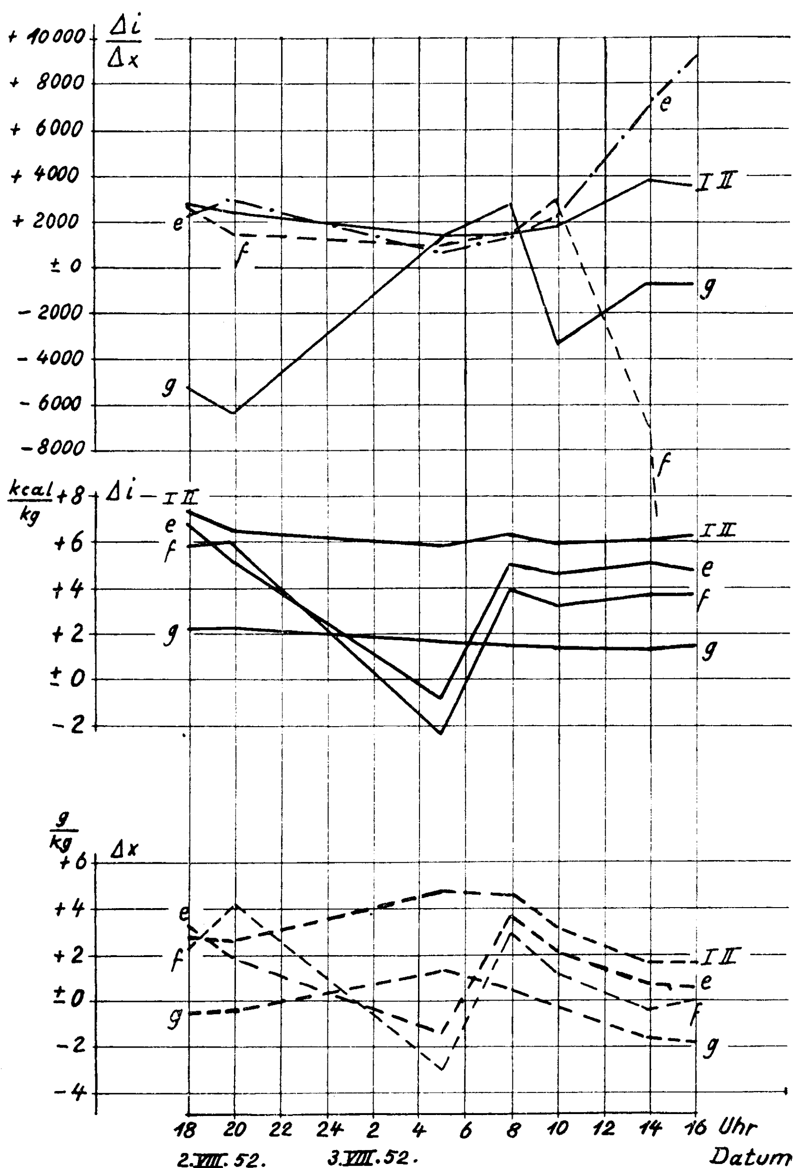



Abb. 8. Messungen Dornburg: Täglicher Verlauf der Abkühlung $\Delta i$ und Wasserausscheidung $\Delta x$ +. Ausgang hik-Pkt.

ausgesprochenen Nachtzeiten nimmt die Wärmeabgabe an den Punkten e und f erheblich ab und kehrt sich für kurze Zeit sogar in eine Wärmeaufnahme um. Hieraus folgt, daß die Luftströmung in der isolierenden Geröllschicht unregelmäßig ist und offenbar von örtlichen Gegebenheiten der Kanalführung stark abhängt. Etwas Ähnliches gilt für die Wasserabgabe bzw. Wasseraufnahme.

Die Meßergebnisse der zusammengefaßten Außenwerte h i k und der am Punkt f austretenden Luft sind als besonders charakteristisch zusammen mit den Punkten der Luft, die aus den Eisstollen austritt, im J-x-Diagramm (Abb. 9) über den Tagesablauf hin dargestellt.

Die Luft außerhalb des Berges (h i k) hat im großen ganzen konstanten Wärmeinhalt. Es handelt sich also im wesentlichen um einen reinen Verdunstungsvorgang. Im einzelnen sinkt von 18 bis 20 Uhr die Temperatur bei konstantem Wasserdampfgehalt, nachdem die Sonnenerwärmung weggefallen ist. In ähnlicher Weise sind auch die Luftänderungen an anderen Tagen des Jahres beobachtet worden. Gegen 22 Uhr setzte ein Gewitter mit leichten Niederschlägen ein. Die Oberfläche des Gerölls befeuchtete sich, und es setzte eine weitere Temperaturerniedrigung bis morgens 5 Uhr ein, aber in der Weise, daß wohl Wasserdampf durch Verdunstung aufgenommen wurde und die dabei gebundene Wärme gerade ausreichte, um nicht nur das Wasser, sondern auch die Luft abzukühlen. Bei diesem Verdunstungsvorgang tauscht die Luft eigene Wärme gegen Wasserdampf aus, ein Vorgang ähnlich dem am feuchten Strumpf des Psychrometers. Die Luft wird dabei schwerer und sinkt am Berghang stärker ab, so daß die aus den Eisstollen austretende Luft ihre Geschwindigkeit etwas vermindert.

Nach 5 Uhr morgens setzt der umgekehrte Vorgang ein. Dem Sonnenaufgang folgt eine allgemeine Lufterwärmung, die aber nicht zu einer Steigerung des Wärmeinhaltes führt. Auch bei dieser Erwärmung bleibt der Wärmeinhalt konstant. Zunächst gibt die Luft Wasserdampf als Niederschlag an das Geröll ab, und die dabei freiwerdende Wärme bedingt die Temperaturerhöhung nicht nur des Wassers, sondern auch der Luft. Die Luft tauscht eigene Wärme gegen Wasserniederschlag aus. Sie wird dabei leichter und steigt am Berghang nach oben, tritt dann an verschiedenen Stellen oben in den Berg ein und vergrößert somit die Austrittsgeschwindigkeit der Luft aus den Eisstollen. Erst nach 16 Uhr, als die Sonnenbestrahlung das Geröll sehr intensiv trifft, tritt eine Steigerung des Wärmeinhaltes der Luft ein. Die Gewitterstörung hat zwar den äußeren Temperaturverlauf wesentlich beeinflußt, in Verbindung mit den Beobachtungen bei f zeigt dieser Verlauf jedoch auch in etwa den Temperaturgang in der isolierenden Geröllschicht über der Eisgrenze.

Betrachtet man die Verhältnisse bei f, so findet man, wenn man von dem Gewittereinfluß um 5 Uhr absieht, etwa gleichartige Temperaturwerte, die sämtlich unterhalb der Kühlgrenze der Außenluft liegen, und

zwar im fast gesättigten Zustand der Luft. Nachts während und nach dem Gewitter bis 5 Uhr zeigt die Luft eine erhebliche Wasseraufnahme mit einer Temperatursteigerung, die auf das warme Niederschlagswasser zurückzuführen ist, das in der Geröllschicht nach unten sickert und mit der oberhalb der Eisstollen austretenden Luft zusammentrifft. Nach 5 Uhr ist dieser Vorgang abgeschlossen, so daß dann der eigentliche Kühleffekt der Eisschicht einsetzt.

Aus der Klima- und Kältetechnik ist bekannt, daß der Temperaturverlauf der Luft, die an einer kalten Oberfläche vorbeiströmt, im J-x-Dia-

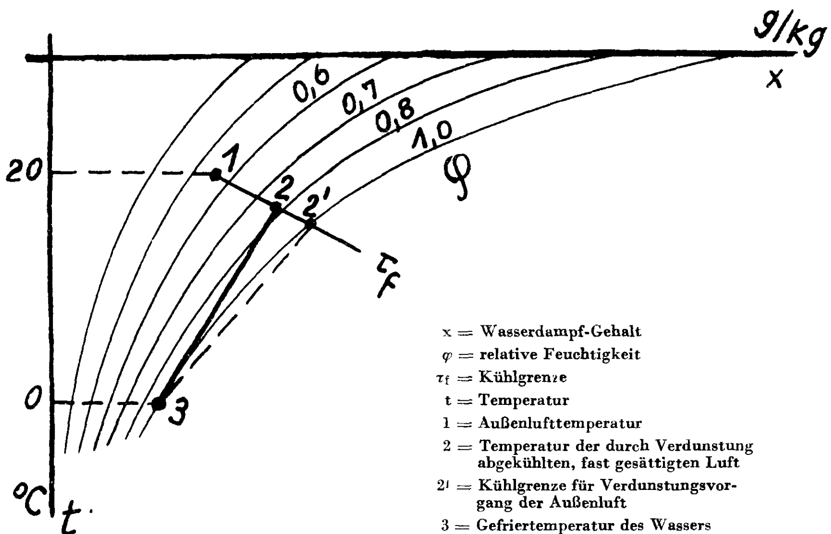



Abb. 10. Schematische Darstellung der Verdunstung und Abkühlung im t—x-Diagramm

gramm geradlinig zwischen der Luftanfangstemperatur und der Oberflächentemperatur der Kühlstelle ist. Da nun die Austrittswerte bei f nahe der Sättigungsgrenze liegen, ist dieser geradlinige Verlauf nur möglich, wenn die Luft, die auf die Eisgrenze trifft, bereits durch Verdunstung so weit vorgekühlt ist, daß sie fast gesättigt ist. Schematisch (Abb. 10) ist daher der Verlauf im J-x-Bild folgendermaßen zu denken:

Bei der Abkühlung von 1 bis 2 bei konstantem Wärmeinhalt ist hier eine Verdunstung in der Geröllschicht zu denken. Mit dem Wärmeinhalt und Wasserdampfgehalt des Punktes 2 trifft die Luft auf die Eisgrenze im Geröll. Hier findet der Abkühlungsvorgang nach der Geraden 2—3 statt. Dieser Abkühlungsvorgang verläuft nahe der Sättigungsgrenze der Luft, ohne sie zu überschreiten.

Ist der Verdunstungsvorgang der Außenluft so intensiv, daß die Kühlgrenze bei 2′ erreicht wird, so verläuft die Gerade der Abkühlung der Eisoberfläche im Nebelgebiet. Es müssen sich Dunstschleier über der Eisoberfläche bilden. Derartige Nebelschwaden wurden an der Dornburg nicht beobachtet, woraus zu schließen ist, daß der Abkühlungsvorgang etwas nach 2—3 vor sich geht. In der Rother Eishöhle (s. u.) wurden jedoch solche Nebelschwaden sowohl in der Höhle selbst als auch am Ausgang beobachtet. Hier verläuft der Abkühlungsvorgang offenbar nach 2′—3.

### 6. Der jährliche Verlauf

der meteorologischen Verhältnisse (Abb. 11) zeigt, daß sich wesentliche Änderungen einstellen. In der graphischen Darstellung sind für die einzelnen Meßtage stets die Werte um die Mittagszeit zum Vergleich herangezogen (siehe auch Tafel 1—5).

Zunächst zeigt die Luftgeschwindigkeit $w_I$ an den Stollenausgängen einen stark wechselnden Verlauf. Im Februar tritt die Luft mit einer Geschwindigkeit von 0,8 m/s in die Stollen, also in den Berg ein. Im Juni erreicht die aus dem Stollen austretende Luftgeschwindigkeit einen Höchstwert von 1,3 m/s und fällt in den folgenden Monaten wieder ab. Im September ist eine Luftbewegung nicht mehr festzustellen, ebenso wie es auch im März bzw. April gewesen sein mag. Diese Tatsache war ja schon von THOMÄ berichtet worden, allerdings ohne Angabe der Größe der Luftgeschwindigkeit. Die THOMÄ noch rätselhaft erscheinende Beobachtung, daß im Winter die Luft in den Berg kälter als 0° C eintritt, findet ihre Erklärung darin, daß eben die unter 0° liegende atmosphärische Außenluft durch echte Kaminwirkung in den noch teilweise vereisten Berg, der im Innern mit 0° C wärmer als die Außenluft ist, eingesaugt wird. Diese Kaminwirkung ist ein ähnlicher Vorgang, wie in jedem beheizten Ofen. Die eingesaugte kältere Außenluft im Winter friert nun den Berg auf und verstärkt die Mächtigkeit der Vergletscherung, und das hat auch THOMÄ wieder richtig gedeutet. Aus der im Berg vorhandenen Feuchtigkeit und dem Niederschlagswasser wird Eis, was sich so für den Sommer aufspeichert und ein natürliches Eislager bildet. Die Dornburg ist somit ein natürlicher Eiskeller.

Die Temperatur über den Jahresverlauf zeigt beim Austritt aus dem Stollen $t_I$ eine dauernd steigende Tendenz, woraus folgt, daß die Kühlwirkung im Laufe des Jahres nachläßt, weil ein großer Teil des Eises abschmilzt.

Für die Beurteilung der äußeren Luftverhältnisse ist in Abbildung 11 nur noch der bei b gemessene Wert aufgetragen, da sich gezeigt hat, daß die bei h i k gemessenen werte im wesentlichen diesem Wert parallel verlaufen. Die Außentemperatur $t_b$ erreichte im Juni ihren höchsten Wert, als auch die Luftaustrittsgeschwindigkeit im Berg ihr Maximum hatte. Unter Berücksichtigung der relativen Feuchtigkeit $\varphi_b$ erreicht der Wärme-

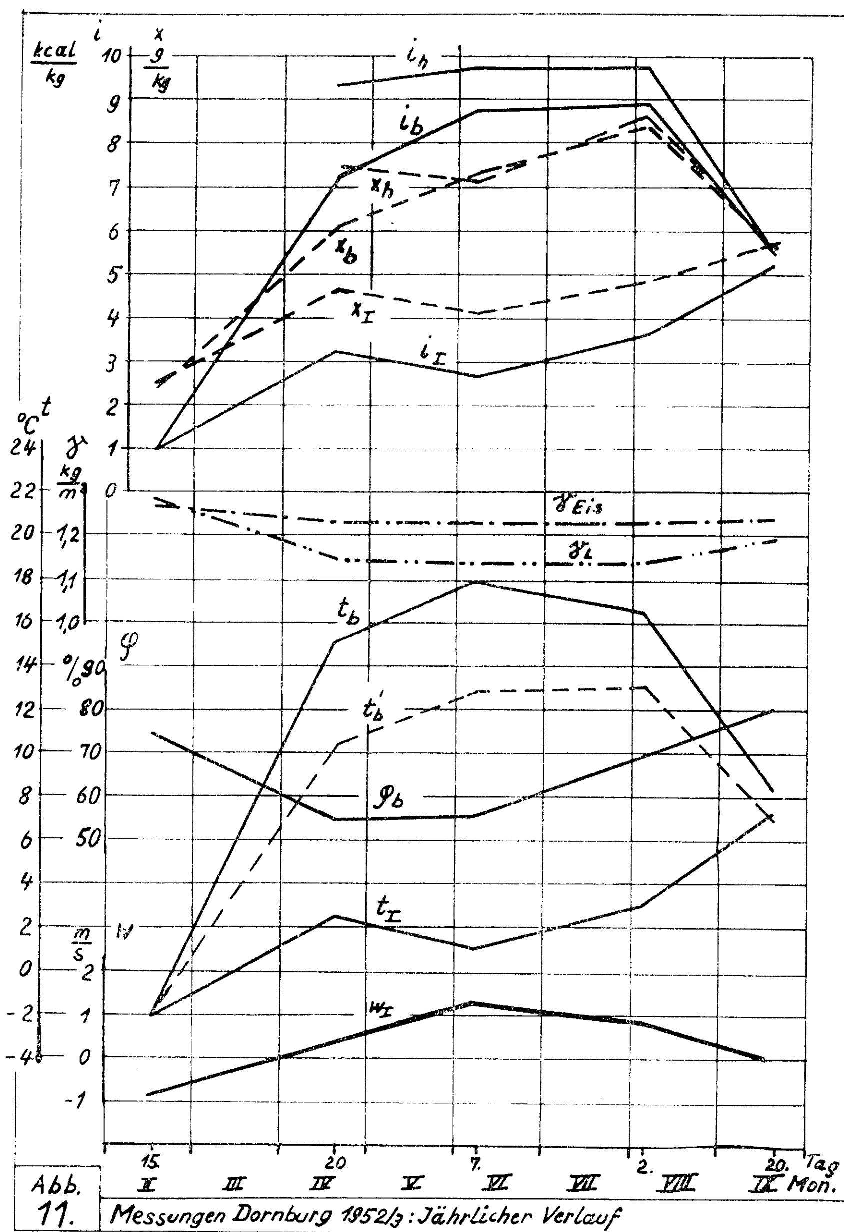


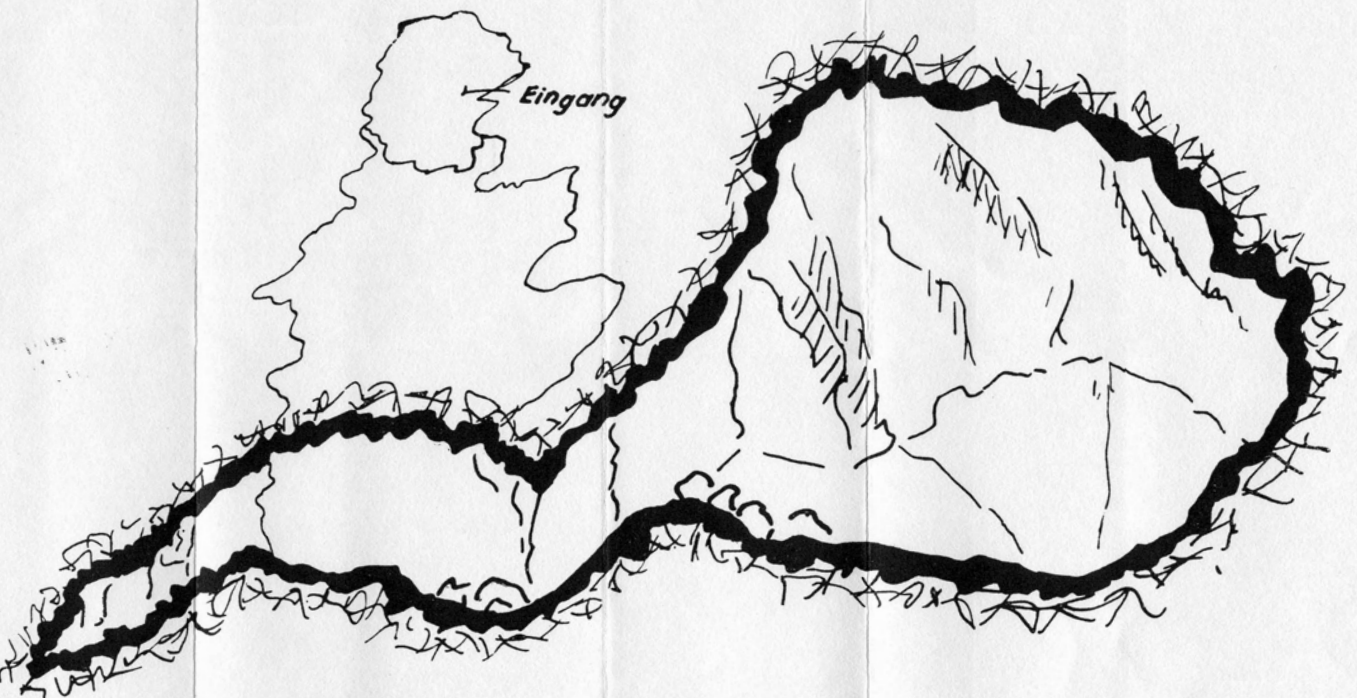
Abb. 11. Messungen Dornburg 1952/3: Jährlicher Verlauf

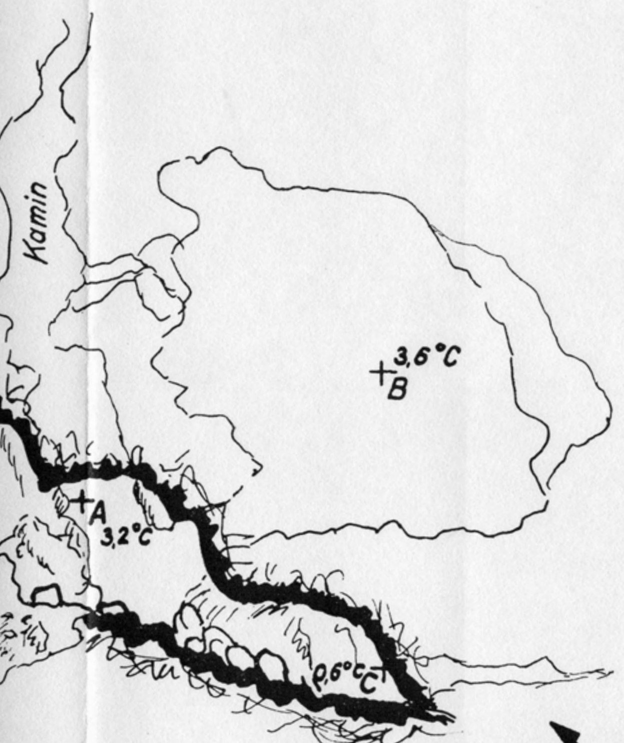


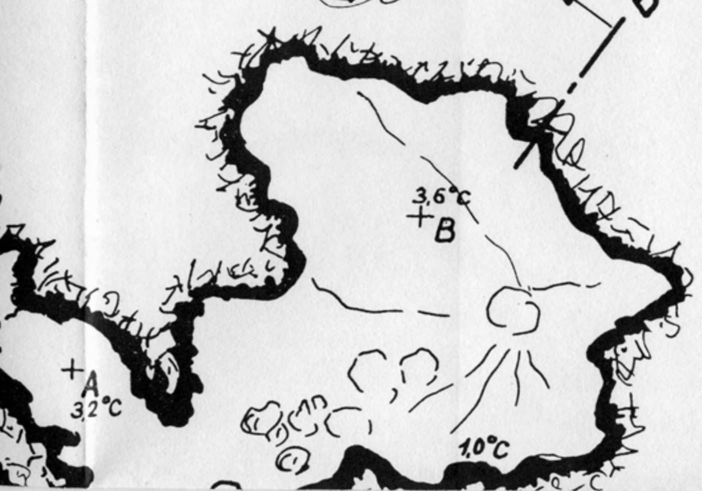
Abb. 12. Rother Eishöhle: Eingang zur Höhle von Osten her.
(Photo Verfasser.)

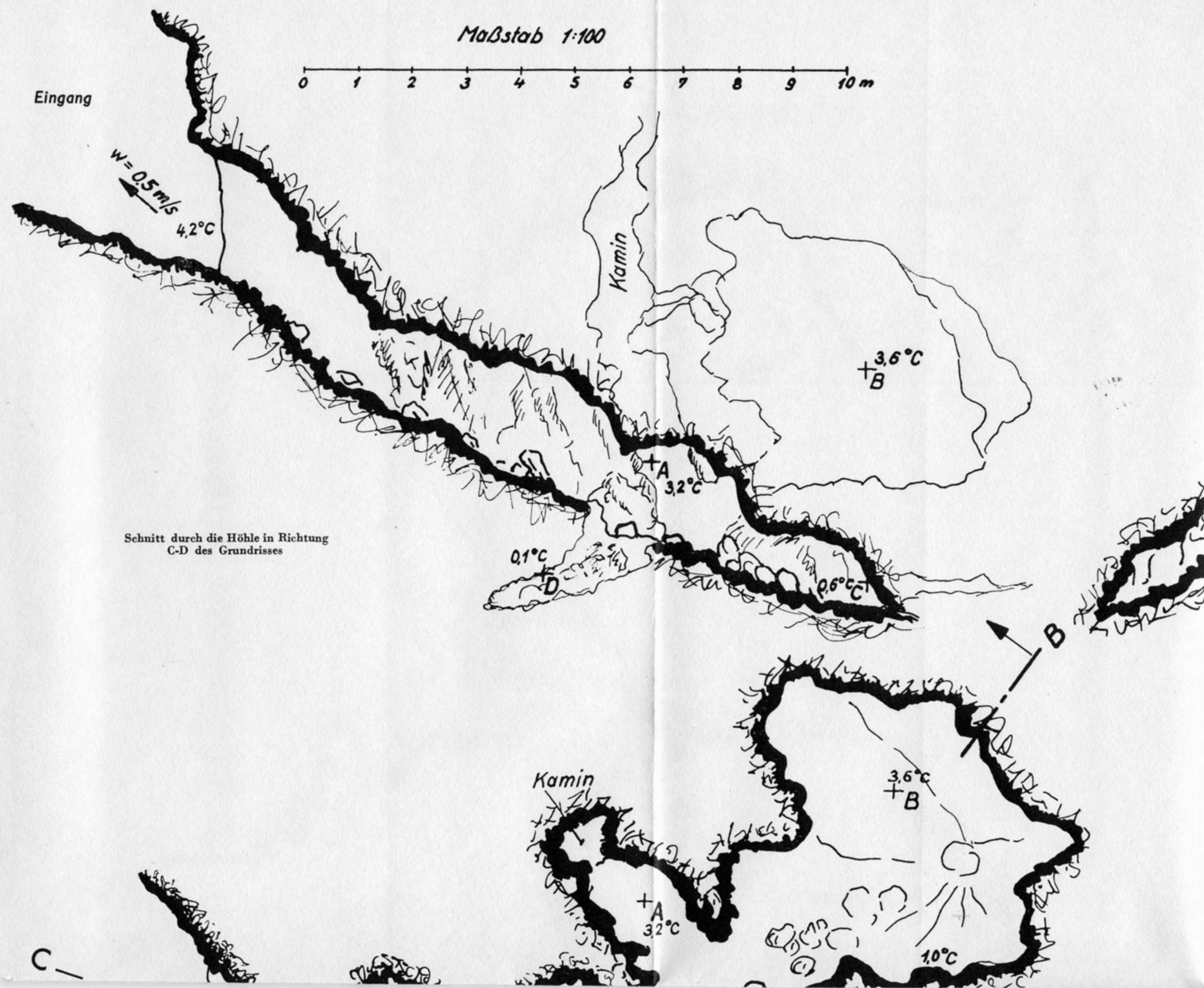


Abb. 14. Rother Eishöhle: Umgebung des Höhleneingangs, der in einem trichterförmigen Kessel liegt.
(Photo Verfasser.)

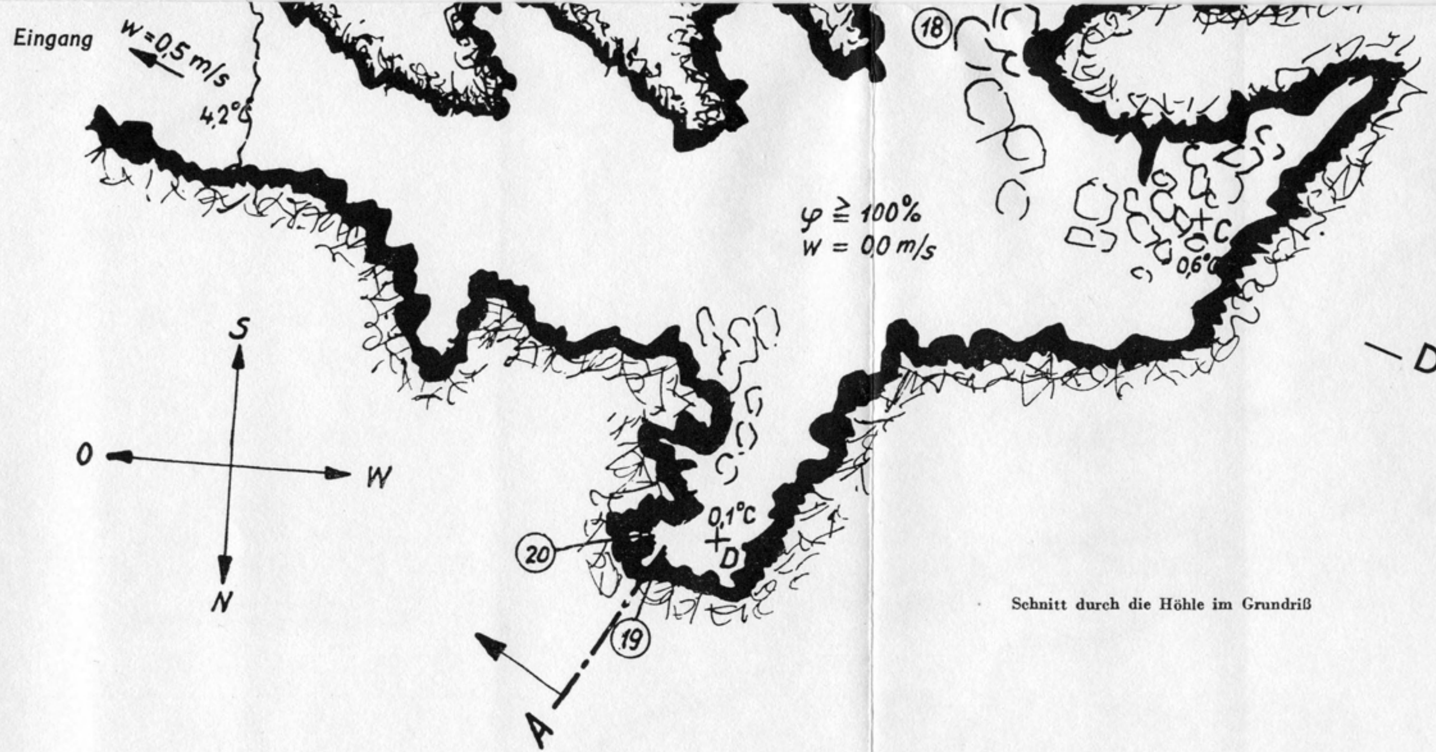

Schnitt A-B
Eingang


6
7
8
9
10 m
Kamin
3,6°C
B
A
3,2°C
0,6°C
C
B


3,6°C
B
A
3,2°C
1,0°C




Schnitt durch die Höhle in Richtung C-D des Grundrisses




Schnitt durch die Höhle im Grundriß

Abb. 13. Eishöhle Roth in der Eifel.

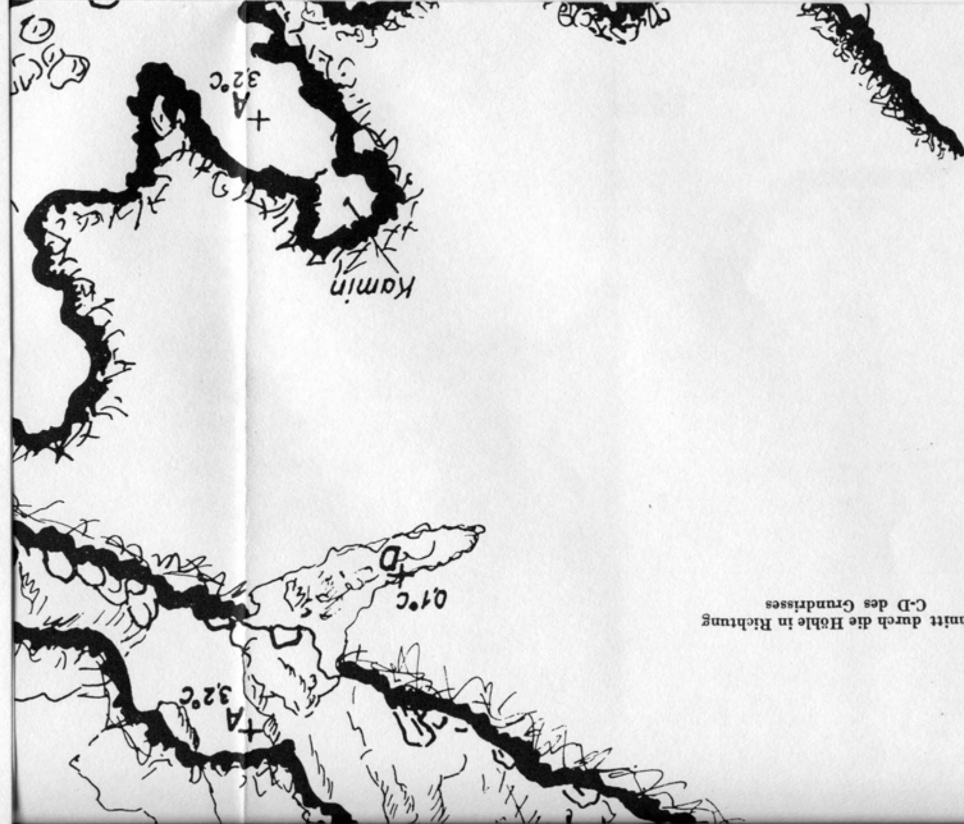
Ungefähre Abmessungen mit Meßergebnissen vom 9. 8.

B = 715 mm Hg H = 530 r
w = Luftgeschwindigkeit φ = relati
18, 19, 20 = siehe Abb. 15, 16, 17 A, B, C, D = Meßs

ifel.

9. 8. 53 $10^{30}$—$14^{00}$

530 m ü. NN.
relative Feuchtigkeit
Meßstellen




Schnitt durch die Höhle in Richtung
C-D des Grundrisses



Abb. 15. Höhlendecke an der Stelle 18 (siehe Abb. 13) bedeckt mit zahlreichen weiß glitzernden Wassertröpfchen. (Photo Derendorf.)

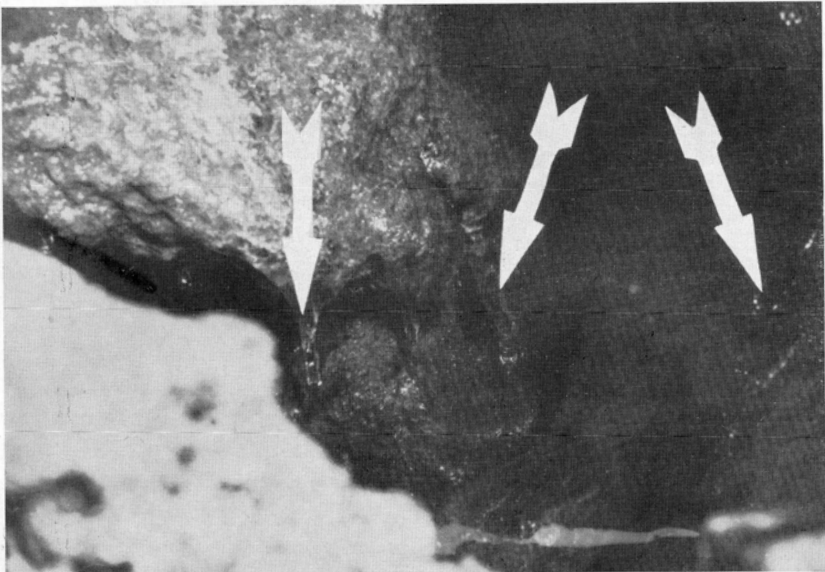


Abb. 17. In der Höhle einzelne Eisbildungen, in Richtung der Pfeile an der Stelle 20 (siehe Abb. 13). (Photo Derendorf.)

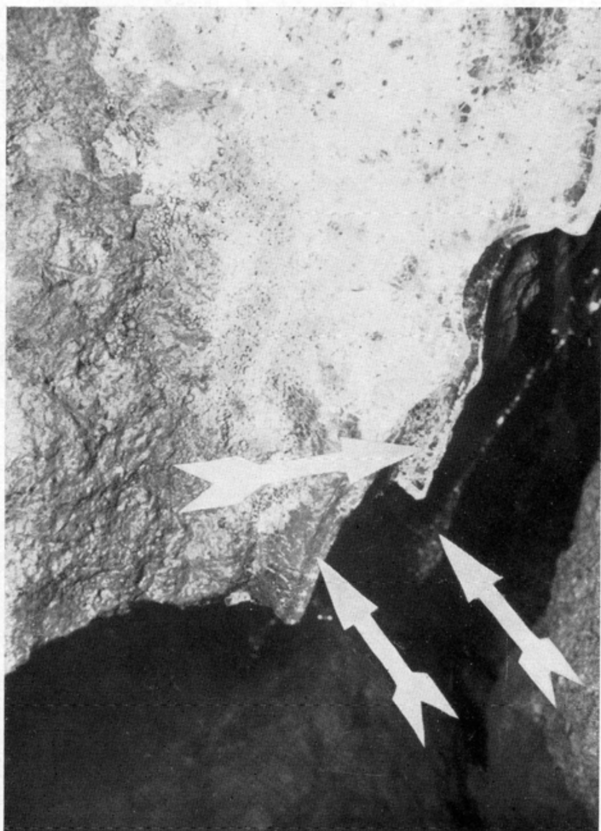


Abb. 16. In der Höhle Eiszapfen an der kältesten Stelle 19 an einer vorspringenden Nase der Höhlenwand in Richtung der Pfeile (siehe Abb. 13).
(Photo Derendorf.)

inhalt der Außenluft im August den größten Wert, gleichzeitig ist aber auch der Wärmeinhalt $i_I$ der aus dem Stollen austretenden Luft angestiegen. Etwas Ähnliches gilt auch für den Wassergehalt x.

Im September war eine Luftbewegung im Eisstollen nicht mehr vorhanden. Die Temperatur der hier austretenden Luft $t_I$ zeigt etwa die des feuchten Thermometers $t_b'$ an, d. h. die Abkühlung ist eine reine Verdunstungswirkung bis zur Kühlgrenze, was auch daraus hervorgeht, daß der Wärmeinhalt der Außenluft $i_b$ demjenigen der Luft an den Eisstollen $i_I$ gleicht. Im Februar war die Temperatur der Luft, die an den Eisstollen eingesaugt wurde, gleich der Außentemperatur, etwa —2° C. Wenn hier THOMÄ etwas anderes gemessen hat, so dürfte das vielleicht damit zu erklären sein, daß kein Beharrungszustand vorlag. Jedenfalls zeigt dieser Meßpunkt, daß die damals in den Berg eintretende Luft tatsächlich zur Verstärkung des Eisvorrates beitragen kann.

## 7. Folgerungen aus den Messungen

Betrachtet man (Abb. 8) den Wärmefluß von Außenluft an das Berginnere und umgekehrt, so ist es möglich, auch quantitativ die physikalischen Vorgänge zu erfassen. Mit einem durchschnittlichen Wert der an den Eisstollen festgestellten Austrittsgeschwindigkeit von 0,85 m/s ergibt sich bei einem freien Austrittsquerschnitt von zusammen 1 $m^2$ eine Luftmenge von 3780 kg/h. Der Durchschnittswert der Wärmeinhaltsdifferenz zwischen Außenluft und Eisstollen liegt bei $\Delta_i = 6{,}3$ kcal/kg; das bedeutet, daß bei der Luftabkühlung eine Wärmemenge von $Q = 3780 \cdot 6{,}3 =$ 23800 kcal/h gebunden wird. Würde man diese Kälteleistung mit einer Kältemaschine z. B. durch Ammoniakverdampfung erreichen wollen, benötigte man eine Antriebsleistung für den Verdichter von etwa 8 kW. Das leistet hier also die Natur durch die besonderen geologischen und meteorologischen Verhältnisse, zusammen mit einigen noch zu erörternden Bedingungen. Diese Kälteleistung geht auf Kosten schmelzenden Eises, was bedeutet, daß stündlich $\frac{23800}{80} = 297$ kg/h Eis abschmelzen und als Sickerwasser zunächst verschwinden. Aus der Luft wird, wie schon erwähnt, außerdem Wasserdampf am Eis niedergeschlagen, und zwar im Mittel (Abb. 8) $\Delta_x = 3{,}0$ g/kg. Das bedeutet eine gesamte Wasserabgabe $W = 3780 \cdot \frac{3{,}0}{1000} = 11$ kg/h. Insgesamt sickern also 308 kg/h Wasser in den Boden, vermischen sich mit dem Niederschlagswasser und fließen den Quellen oder dem Grundwasser zu.

Die tägliche Schmelzmenge des Eises beträgt dann $297 \cdot 24 =$ 7130 kg/Tag. Es entsteht die Frage, ob nicht diese gewaltige Menge von über 7 t Eis pro Tag in kurzer Zeit den gesamten Berg auftauen könnte. Mit 5 Monaten Abschmelzdauer ergibt sich eine gesamte Schmelzmenge von $7130 \cdot 30 \cdot 5 = 1069500$ kg im Jahr, also mehr als 1000 t. Diese Eis-

menge repräsentiert einen Rauminhalt von 1188 $m^3$ reinen Wassers im Jahr. Nimmt man an, was aus der Filtertechnik bekannt ist, daß in einem solchen Geröll zwischen den Steinen und dem Erdreich nur 20% freier Raum für reines Eis vorhanden ist, so besagt das, daß in einem Jahr 5940 $m^3$ Geröll mit Eis vermischt auftauen kann. Die Grundfläche der vereisten Geröllhalde kann mit 2400 $m^2$ angenommen werden, so daß eine Mächtigkeit von $\frac{5940}{2400}$ = etwa 2,5 m auftaut. Nachdem THOMÄ durch direkte Grabungen Eis bis zu 8 m Tiefe gefunden hat, geht aus dieser Rechnung hervor, daß das Eis durch die sommerlichen Schmelzvorgänge gar nicht vollständig abschmelzen kann. Es ist daher nicht unberechtigt, vom ewigen Eis in der Dornburg zu sprechen. Allerdings liegt das Eis im Berg, nicht sichtbar. Die tieferen Eisschichten sind sicher schon sehr alt. Wenn also jährlich 2 bis 3 m Geröll in der Tiefe auftauen, so kann naturgemäß gegen Ende des Jahres die Luft nicht so stark abgekühlt werden, weil die Eisgrenze in die Tiefe wandert und die Luft nicht mehr so intensiv mit dem Eis beim Durchstreichen in Berührung kommt.

Ähnlich wie an den Eisstollen sind auch Vereisungen in dem Berghang oberhalb des ländlichen Anwesens anzunehmen, wo früher die Brauerei mit ihren Eiskellern stand. Hier tritt im Hochsommer aus dem noch benutzten Keller mit einem freien Querschnitt von 1,7 $m^2$ die Luft mit einer Geschwindigkeit von 1,5 m/s aus, was einer Luftmenge von 11200 kg/h entspricht. Bei einer Wärmeinhaltsdifferenz von $\Delta_i = 5$ kcal/kg bedeutet das eine Kälteleistung von $Q = 56000$ kcal/h. Hierfür müßte eine Kältemaschine eine Antriebsleistung von etwa 18 kW haben. Die in dem Keller austretende Luft hat eine Temperatur von 6° C. Eis ist in dem Keller nicht zu beobachten. Da aber auch dieser Temperaturwert unter der Kühlgrenze der Außenluft liegt, muß der Berg auch hier vereist sein. Die Brunnenwassertemperatur des Anwesens beträgt 6° C, offenbar handelt es sich in der Hauptsache um das Schmelzwasser des Eisberges.

Die Quelle im Wiesengrund unterhalb des Anwesens liefert etwa 27 $m^3/h$ Wasser von etwa 6 bis 7° C im Sommer. Diese Menge ist größtenteils Niederschlagswasser aus dem Einzugsgebiet der gesamten Bergfläche. Selbst wenn man annimmt, daß insgesamt vielleicht 1 $m^3/h$ Schmelzwasser anfällt, so sind das noch nicht 4%, wovon zweifellos noch ein Teil im Grundwasser verschwindet und auf anderen Wegen dem Elbbach zufließt. Von den weiteren zwei Quellen, über die THOMÄ noch berichtet, ist nichts mehr aufzufinden. Bei der Unsicherheit der Annahmen soll auf eine weitere Wärmebilanz verzichtet werden.

### 8. Die Rother Eishöhle

In der Eifel bei Gerolstein ist eine Eishöhle, die ganz ähnliche Vereisungserscheinungen wie die Dornburg im Westerwald zeigt. Sie ist ebenfalls Teil einer Bergkuppe, die aus lockerem Eruptivgestein, Basalt, besteht.

Sie liegt in 530 m Höhe einer 560 m hohen Bergspitze. Zwei weitere benachbarte Bergkuppen bilden ein Ganzes und heißen Rother Kopf. Auch diese Eishöhle steht unter Naturschutz. Der Rother Kopf ist mit Laubwald bestanden. Die Kuppe ist felsig und auch mit einzelnen Steinbrocken belegt. Sie wurde als Steinbruch benutzt, hauptsächlich um Mühlsteine zu gewinnen. Dieser Tatsache verdankt die Eishöhle vielleicht nicht ihre Entstehung, so doch ihre Erweiterung. Neben dieser Höhle mit den Vereisungserscheinungen befindet sich noch die sogenannte Mühlsteinhöhle ohne Vereisung, und daneben finden sich noch Zerklüftungen kleineren Ausmaßes mit ähnlichen Erscheinungen, wie in der eigentlichen Rother Eishöhle. Der Eingang der Höhle (Abb. 12) findet sich am Fuße einer trichterförmigen Bodenvertiefung, deren Durchmesser oben etwa 8 bis 9 m beträgt. Der Eingang führt zu einem Gang in die Tiefe. Im Berginnern hat die Höhle verschiedene Gänge und Abzweigungen. Die größte Länge vom Eingang bis zum tiefsten Punkt beträgt in gestreckter Länge 14 m. Mit allen ihren Gängen hat die Höhle eine Gesamtlänge von 32 m. Ein ungefähres Bild in Grund- und Aufriß zeigt die Abbildung 13. Die Höhle hat bei der Stelle A beginnend einen kaminartig nach oben führenden Spalt, der sich stark verengt und nicht besteigbar ist, aber offenbar Verbindung nach außen hat. Über dem Eingang der Höhle erheben sich verhältnismäßig steile Felsen bis zu einer Höhe von 15 m mit zahlreichen Felsspalten (Abb. 14).

Die sommerlichen Vereisungserscheinungen sind denen der Dornburg sehr ähnlich. Am 5. April 1953 zwischen 12 und 14 Uhr wurden Messungen am Höhleneingang durchgeführt. Bei Sonnenschein und einem Barometerstand von 707 mm Hg betrug in der Umgebung der Höhle die Außentemperatur 8,7° C, das feuchte Thermometer zeigte 5,9° C, woraus eine relative Feuchtigkeit von 65% folgt. Hieraus errechnet sich ein Wärmeinhalt $i = 4{,}8$ kcal/kg und ein absoluter Wasserdampfgehalt $x = 4{,}7$ g/kg. Aus der Höhle trat ein kalter Luftstrom von 0,4° C und 100% relativer Feuchtigkeit mit einer Geschwindigkeit von 0,5 bis 0,6 m/s nach außen. Die Luft außerhalb der Höhle, aber in der Nähe des Einganges, zeigte an verschiedenen Stellen Temperaturen zwischen 1,5 und 7,0° C. Der Boden des Höhleneinganges und Teile der Wände waren mit einer 1 bis 2 cm dicken Eisschicht bedeckt, die am Boden spiegelglatt war und ein weiteres Eindringen in die Höhle ohne Sicherungsmittel nicht gestattete.

Der Höhleneingang ist etwa 1,50 m breit und 1,20 m hoch, was einen Querschnitt von 1,8 m² ergibt. Bei einer Luftgeschwindigkeit im Mittel von 0,55 m/s ergibt sich eine Luftmenge von 4280 kg/h. Der Wärmeinhalt der austretenden Luft ist $i = 2{,}5$ kcal/kg und der absolute Wasserdampfgehalt $x = 4{,}0$ g/kg. Mit der Wärmeinhaltsdifferenz zwischen Außenluft und der aus der Höhle ausströmenden Luft $\Delta_i = 2{,}3$ kcal/kg repräsentiert also diese Eishöhle eine Kälteleistung von $Q = 4\,280 \cdot 2{,}5 = 9\,800$ kcal/h, und es ergibt sich eine Schmelzwassermenge von $\frac{9800}{80} = 122{,}5$ kg/h Eis.

Bei dem Durchströmen der warmen, trockenen Außenluft durch den Berg bis zum Austritt aus dem Höhleneingang gibt die Luft $\Delta_x = 0{,}7$ g/kg Wasserdampf ab, insgesamt also $\frac{4280 \cdot 0{,}7}{1000}$ = etwa 3 kg/h. Die Summe aus Schmelz- und Niederschlagswasser beträgt also etwa 125 kg/h.

Im Hochsommer, am 9. August 1953 (siehe auch Abb. 13), wurden in der Mittagszeit von 10 bis 14 Uhr erneut Messungen durchgeführt. Der Eingang zur Höhle war nicht mehr vereist, und aus dem Höhlengang stieg Nebel aus, der etwa bis 13 Uhr anhielt. Das Barometer zeigte 715 mm Hg. Rechts und links vom Höhleneingang wurden folgende Temperaturen gemessen:

| Uhrzeit ..... | 10.25 | 13.00 | 13.45 |
|---|---|---|---|
| rechts ....... | 9,8° C | 14,5° C | 12,0° C |
| links ........ | 7,8° C | 10,0° C | 8,2° C |

In weiterer Entfernung von der Höhle wurden in derselben Zeit acht verschiedene Messungen vorgenommen, die — abgesehen von einem Anstieg gegen 13 Uhr — nur geringe Schwankungen zeigten. Als Mittelwert fand sich eine Temperatur des trockenen Thermometers von 19,5° C, des feuchten Thermometers von 13,9° C. Damit liegt also die Kühlgrenze für reinen Verdunstungsvorgang bei rund 14° C. Der Wärmeinhalt der Außenluft betrug somit $i = 9{,}47$ kcal/kg und der absolute Wassergehalt $x = 7{,}94$ g/kg. Im Höhleneingang zeigte das trockene Thermometer 4,2° C und das feuchte 4,0° C an, was einem Wärmeinhalt $i = 4{,}17$ kcal/kg und einem absoluten Wassergehalt $x = 5{,}24$ g/kg entspricht, wobei die relative Feuchtigkeit 99% beträgt. Die Luft vermindert also beim Durchstreichen durch den Berg ihren Wärmeinhalt um $\Delta_i = 5{,}30$ kcal/kg und gibt eine Wassermenge von $\Delta_x = 2{,}70$ g/kg an die Eisoberfläche ab.

Da auch hier, ähnlich wie bei der Dornburg, die Temperatur der aus der Höhle austretenden Luft wesentlich unter der Kühlgrenze liegt, kann die Abkühlung nicht auf reine Verdunstung zurückzuführen sein, sondern ist auch nur damit zu erklären, daß der Berg im Innern vereist ist und daß die Luft sich bei der Berührung mit der Eisoberfläche unter die Kühlgrenze abkühlt. Die Geschwindigkeit der aus der Höhle austretenden Luft lag bei 0,5 m/s im Mittel. Bei 1,8 $m^2$ Luftquerschnitt entspricht das einer Luftmenge von 3 790 kg/h. Damit stellt also die Luftabkühlung in dem vereisten Berg eine Kälteleistung von $Q = 3790 \cdot 5{,}3 = 20000$ kcal/h dar, wozu eine technische Kältemaschine eine Antriebsleistung von etwa 6,7 kW benötigen würde. Die Schmelzwassermenge beträgt damit $\frac{20000}{80}$ = 250 kg/h und die Wasserausscheidung aus der Luft $\frac{3790 \cdot 2{,}7}{1000} = 10{,}2$ kg/h. Insgesamt fallen also stündlich rund 260 kg Wasser an. Der aus der Höhle tretende Nebel ist dadurch zu erklären (Abb. 9 u. 10), daß sich die in ver-

schiedene Spalten in den Berg eintretende Luft durch Wasserdampfaufnahme aus dem Gestein, das taufeucht ist, durch reine Verdunstung bei konstantem Wärmeinhalt abkühlt. Kommt die Luft dabei nahe an ihren Sättigungspunkt, wenn sie mit der Eisoberfläche in Berührung tritt, so findet die weitere Abkühlung, wenigstens teilweise, im Nebelgebiet unterhalb $\varphi = 1{,}0$ statt, wie schon oben bei der Dornburg erläutert. Im Laufe des Tages wird nun offenbar durch die trockene Luft die Taufeuchte aufgenommen, und die Abkühlung durch Verdunstung geht zurück. Die weitere Abkühlung in dem vereisten Berg verläuft dann innerhalb des Sättigungsgebietes, so daß kein Nebel mehr auftreten kann, was nach 13 Uhr der Fall war.

Die Meßergebnisse innerhalb der Höhle sind in Abbildung 13 eingetragen. Meßbare Luftgeschwindigkeiten in der Höhle oder in den Spalten innerhalb der Höhle konnten nirgends festgestellt werden, d. h. sie liegen unterhalb 0,01 m/s. Die relative Feuchtigkeit betrug 100%, und teilweise waren auch im Innern der Höhle Nebel zu beobachten. Es wurden Messungen an vier verschiedenen Stellen vorgenommen, die mit A, B, C, D bezeichnet sind. Für diese einzelnen Meßpunkte ergaben sich folgende Werte:

| Meßpunkt | t<br>Temperatur<br>° C | i<br>Wärmeinhalt<br>kcal/kg | x<br>Wasserdampfgehalt<br>g/kg |
|---|---|---|---|
| A | 3,2 | 3,70 | 4,95 |
| B | 3,0 | 3,86 | 5,04 |
| C | 0,6 | 2,55 | 4,00 |
| D | 0,1 | 2,42 | 3,92 |

Aus diesen Werten geht hervor, daß im rechten Teil der Höhlenwände kältere Stellen zu finden sind als im linken Teil. Die tiefsten Temperaturwerte fanden sich an der Stelle D, wo praktisch der Gefrierpunkt erreicht war und wo auch eine starke Eisbildung an der Höhlenwand zu beobachten war. Damit ist erwiesen, daß die Luft sich beim Durchstreichen durch die Spalten des Gebirges an dem dort befindlichen Eis abkühlt und daß diese Wirkung bis an die Höhle vordringt. Durch das Abschmelzen des Eises im Laufe des Sommers geht die Eisgrenze zurück, offenbar links von der Höhle stärker als rechts, und die dann am Höhlenausgang ermittelte Temperatur liegt mit 4,2° C höher als die gemessenen Innentemperaturen. Abbildung 15 ist ein Bild von der Decke der Höhle, wo zahlreiche Wassertröpfchen hingen, die auf dem Bilde als weiß glitzernde Punkte zu erkennen sind. Es kann sich hier nicht um Niederschlagswasser der Außenluft handeln, da ja ein dauernder Luftzug aus der Höhle heraus vorhanden ist, sondern es muß sich um Sickerwasser des geschmolzenen Eises handeln.

Abbildung 16 ist eine Aufnahme an der Stelle D. An einer vorspringenden Nase der Höhlenwand sind deutlich Eiszapfen zu erkennen, die ein

vollständig klares Aussehen hatten. Die Pfeile weisen darauf hin. In der Nähe der Stelle bei 20 (Abb. 13) zeigt die Höhlenwand (Abb. 17) weitere Eisbildungen.

Aus diesen Beobachtungen folgt, daß in der Rother Eishöhle auch im Hochsommer noch unmittelbar eine Eisbildung festzustellen ist und daß außerdem auf Grund der Temperaturmessungen der um die Höhle befindliche Berg vereist sein muß, und zwar im rechten Teil stärker als im linken. Diese Schlüsse stehen in Übereinstimmung mit den Beobachtungen an der Dornburg im Westerwald.

Es sei noch bemerkt, daß der Höhlenausgang der Rother Eishöhle nach Osten liegt, der der Dornburg nach Süden. Die geographische Lage scheint demnach für die Vereisungserscheinungen ohne Bedeutung zu sein.

## 9. Bedingungen für die Eisbildung und Eiserhaltung im Sommer

Aus den oben berichteten Messungen und Beobachtungen lassen sich unter Berücksichtigung der aus der Literatur bekannten Beobachtungen an anderen Stellen über die Ursachen der Vereisung und deren Erhaltung während des Sommers folgende notwendige Bedingungen formulieren:

1. Lage der Höhle in Gebieten, in denen die winterlichen Temperaturen unter 0° C sinken, so daß sich durch einströmende Luft im Winter überhaupt Eis bilden kann.
2. Der Berg muß zerklüftet sein oder viele Hohlräume besitzen, so daß ein freier Luftzug durch den Berg möglich ist. Diese Hohlräume können natürlich oder künstlich sein.
3. Es muß eine Kaminwirkung möglich sein, d. h. es müssen Höhenunterschiede für die Luftbewegung vorhanden sein, so daß im Sommer die Luft aus dem Berg austreten und im Winter in ihn einströmen kann. Für das Mittelgebirge werden solche Höhlen daher vorzugsweise an Berghängen möglich sein.
4. Das Niederschlagswasser durch Regen, Tau und Schneeschmelze darf nicht in solchen Mengen in den Berg einsickern, daß das Eis kurz nach seinem Entstehen wieder geschmolzen wird. Für das Mittelgebirge bedeutet das, daß die Höhlen nicht am Fuße eines Berges, sondern etwas höher liegen, daß diese Bergstellen verhältnismäßig steile Hänge haben und das Niederschlagswasser leicht abfließen kann, ohne die inneren vereisten Bergstellen nennenswert zu berühren, oder der Abfluß ins Grundwasser muß durch solche Kanäle erfolgen, die das Eis nicht berühren.
5. Für die Erhaltung des Höhleneises ist es notwendig, daß die Deckschicht über dem vereisten Teil und damit auch über den Höhlen eine wärmeisolierende Wirkung ausübt. Diese Schichten müssen also aus

lockerem Geröll bestehen, das sich durch die hier durchströmende Luft und deren Verdunstungswirkung abkühlt und somit auf niedriger Temperatur gehalten wird.

6. Für die Hochgebirgs-Eishöhlen wird noch angegeben, daß die Höhlen nicht zu großräumig sein dürfen, um das Eis im Sommer zu erhalten. In großen Räumen treten Konvektionsströme innerhalb des Hohlraumes auf, und durch die aufsteigende wärmere und die herabfallende kältere Luft entsteht dann ein Luftwechsel, der das Eis leichter zum Schmelzen bringt. Im Hochgebirge führen die Höhleneingänge zumeist in die Tiefe, was für das Eindringen der kälteren und schwereren Winterluft günstig ist.

## 10. Ausblicke und Folgerungen

Solche Bedingungen für die Bildung einer Vereisung in Bergen sind zweifellos auch noch an anderen Stellen im Mittelgebirge gegeben, als dort, wo sie heute offen zutage treten. Es gibt in der Eifel noch einige andere Stellen, die als Eishöhlen bezeichnet werden. Bekannt seit längerer Zeit sind auch die Eiskeller von Niedermendig.

Für das Vorhandensein solcher Vereisungen ist ein wichtiges Kennzeichen die Temperatur des Quellwassers, das von solchen Bergen stammt. Da die natürliche Bodenwärme bis 25 m Tiefe bei etwa 9° C liegt, dürfte bei einer inneren Bergvereisung ein kälteres Quellwasser im Sommer demnach darauf hindeuten, daß diese Temperatursenkung durch Berührung mit Eis im Berge hervorgerufen ist. Bei Nachgrabungen im Mai oder Juni wird man dann in geeigneter Tiefe auch dieses Eis nachweisen können.

Die Frage der technischen Ausnutzung solcher natürlichen Kältequellen ist in erster Linie eine Frage der Wirtschaftlichkeit. Für die Dornburg hatte Troost durch die Errichtung einer Brauerei einen ersten Anstoß gegeben. Er hat auch noch auf weitere Anwendungsmöglichkeiten hingewiesen. Wie die oben ausgeführten Rechnungen zeigen und auch durch die Errichtung der Brauerei erwiesen ist, reichen die Kälteleistungen für den Betrieb einer kleineren Brauerei oder auch eines kleineren Kühlhauses aus. Da bei der Anlage eines solchen Werkes nicht unerhebliche Erdbewegungen nötig sind, werden die hierfür notwendigen Kosten erheblich größer sein, als die Errichtung einer Kälteanlage in üblichen Gebäuden. Dagegen werden die Betriebskosten geringer sein, soweit es sich um den Antrieb der Kältemaschinen handelt. Dagegen werden die Personal- und allgemeine Unkosten sich nicht nennenswert unterscheiden.

Es ist jedoch zu beachten, daß mit solchen natürlichen Eiskellern nur Temperaturen über 0° C zu erreichen sind, so daß eigentliche Gefrierräume oder Gefrierlagerräume, wie sie durch Kältemaschinenanlagen ohne weiteres möglich sind, nicht hergestellt werden können. Weiterhin ist es nicht möglich, die Raumfeuchtigkeit bei diesen natürlichen Eiskellern ohne be-

sondere Hilfsmittel zu steuern, was ebenfalls mit einer Kältemaschinenanlage durchaus möglich und für gewisse Kühlgüter auch notwendig ist. In den natürlichen Eiskellern wird stets eine sehr feuchte Luft gegeben sein, so daß empfindliche Kühlgüter, wie z. B. Obst, Gemüse und Eier, nicht ohne weiteres gelagert werden können. Es müssen besondere Vorkehrungen getroffen werden, um der Luft den gewünschten Trockenheitsgrad zu geben.

Es ist bisher nicht bekannt geworden, daß diese natürlichen Eiskeller für ähnliche gewerbliche Zwecke verwendet worden sind, außer für gewöhnliche Lagerzwecke von nicht feuchtigkeitsempfindlichen Verbrauchsgütern, wie in dem Restaurationsbetrieb des ländlichen Anwesens an der Dornburg oder in den Eiskellern von Niedermendig.

## 11. Literaturangaben

1. THOMÄ, Dr. C.: Das unterirdische Eisfeld bei der Dornburg. Wiesbaden 1841. — 2. THOMÄ, Dr. C.: Das unterirdische Eisfeld und die warmen Luftströme am südlichen Fuße des Westerwaldes. — Jahrbücher des Vereins für Naturkunde im Herzogtum Nassau, 4. Heft (1849), Wiesbaden. S. 164—202. — 3. TROOST, J.: Die Dornburg und die praktische Ausnutzung der an derselben vorkommenden Erscheinungen. Coblenz 1873. — 4. TROST-GRIMM: Die Dornburg und deren Umgebung. Bechtold Wiesbaden (ohne Jahresangabe). — 5. WOLF, K.: Die Dornburg und ihr Eis. Alt-Nassauischer Kalender 1912, S. 50/51. — 6. RUNKEL, O.: Die Dornburg und ihr Eis. Der schöne Westerwald, S. 290. — 7. v. KNEBEL, W.: Höhlenkunde mit Berücksichtigung der Karstphänomene. Braunschweig 1906. — 8. KEILHACK: Lehrbuch der praktischen Geologie. Stuttgart 1916. — 9. SIEBERG: Geologische Einführung in die Geophysik. Jena 1927. — 10. GRUBENMANN: J-x-Tafeln feuchter Luft. 2. Aufl. Berlin 1942. — 11. FISCHER, E.: In der Eisriesenwelt. Kosmos 1951, Heft 12, S. 543.

## Zahlentafel 1.

Messungen: Dornburg. Datum: 20.4.1952. Barometerstand: 727 mm Hg

| Meßpunkt | | I | II | b | c | d | e | f | g | h | i | k |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Zeit | Uhr | 12 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Luftgeschw. w | m/s | 0,4 | 0,6 | [0,7] | — | 0,8 | 0,6 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | [0,0] | [0,7] |
| Lufttemperatur t | °C | 2,5 | — | 15,2 | 18,2 | 2,5 | 0,5 | — | 14,8 | 20,1 | 22,4 | 19,4 |
| Luftfeuchtigkeit $\varphi$ | % | 100 | — | 55 | 44 | — | — | — | 53 | 49 | 34 | 35 |
| Wärmeinhalt i | kcal/kg | 3,3 | — | 7,3 | 8,0 | — | — | — | 7,0 | 9,4 | 9,1 | 7,7 |
| Wassergehalt x | g/kg | 4,7 | — | 6,2 | 5,9 | — | — | — | 5,7 | 7,5 | 6,0 | 5,0 |

## Zahlentafel 2.

Messungen: Dornburg. Datum: 2.8.1952. Barometerstand: 726 mm Hg

| Meßpunkt | | I | II | b | b' | c | d | e | f | g | h | i | k | $M_{hik}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Zeit | Uhr | 18 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 18 |
| Luftgeschw. w | m/s | 0,8 | 1,1 | — | — | — | 0,6 | 0,8 | 0,4 | 0,5 | [0,0] | [0,5] | [0,0] | — |
| Lufttemptr. t | °C | 3,5 | 3,9 | 23,6 | 23,0 | 22,0 | 7,2 | 6,2 | 7,8 | 11,8 | 16,6 | 27,4 | 25,8 | 26,3 |
| Luftfeucht. $\varphi$ | % | — | — | 43 | — | — | — | 74 | 81 | 93 | 36 | 31 | 37 | — |
| Wärmeinh. i | kcal/kg | — | — | 10,6 | — | — | — | 4,2 | 5,2 | 7,8 | 11,2 | 11,1 | 10,9 | 11,0 |
| Wassergeh. x | g/kg | — | — | 8,1 | — | — | — | 4,5 | 5,4 | 8,3 | 8,0 | 7,3 | 7,8 | 7,7 |

| Meßpunkt | | I | II | b | b' | c | d | e | f | g | h | i | k |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Zeit | Uhr | 20 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| w | m/s | 0,9 | 1,0 | — | — | — | 0,4 | 0,7 | 0,4 | 0,0 | [0,0] | [0,0] | [0,0] |
| t | °C | 3,0 | 3,1 | 19,0 | 21,5 | 20,5 | 11,4 | 5,5 | 8,3 | 12,5 | 22,6 | 23,5 | 22,8 |
| $\varphi$ | % | 100 | 100 | 54 | — | — | 100 | 100 | 54 | 87 | 45 | 42 | 42 |
| i | kcal/kg | 3,6 | 3,6 | 9,1 | — | — | 7,8 | 4,8 | 4,1 | 7,8 | 10,1 | 10,2 | 9,8 |
| x | g/kg | 4,9 | 4,9 | 7,6 | — | — | 8,5 | 5,7 | 3,4 | 8,0 | 7,8 | 7,6 | 7,2 |

| Meßpunkt | | $M_{hik}$ | I | II | b | b' | c | d | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Zeit | Uhr | 20 | 22 | — | — | — | — | — | |
| w | m/s | — | 0,95 | 0,75 | — | — | — | 0,6 | |
| t | °C | 23,0 | 3,1 | 3,1 | 19,0 | 20,3 | 19,7 | — | Gewitter |
| $\varphi$ | % | — | 100 | 100 | 70 | — | — | — | |
| i | kcal/kg | 10,0 | 3,6 | 3,6 | 10,5 | — | — | — | |
| x | g/kg | 7,5 | 4,9 | 4,9 | 9,9 | — | — | — | |

Zahlentafel 3. Messungen: Dornburg. Datum: 3. 8. 1952. Barometerstand: 729 mm Hg

| Meßpunkt | | I | II | b | b′ | c | d | e | f | g | h | i | k | $M_{hik}$ | I | II | b | b′ | c | d | e | f | g | h | i | k |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Zeit | Uhr | 5 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 8 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Luftgeschw. w | m/s | 0,75 | 0,8 | — | — | — | 0,6 | 0,5 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | [0,4] | [0,6] | — | 0,6 | 0,7 | — | — | — | 0,8 | 0,6 | 0,4 | 0,0 | [0,8] | [1,6] | [1,8] |
| Lufttemptr. t | $^{0}$C | 3,3 | 3,2 | 14,1 | 14,5 | 14,5 | 18,3 | 15,8 | 18,2 | 12,1 | 15,3 | 15,3 | 14,8 | 15,1 | 3,2 | 3,2 | 15,0 | 15,8 | 15,5 | 11,5 | 6,1 | 8,8 | 13,0 | 17,8 | 17,6 | 17,8 |
| Luftfeucht. $\varphi$ | % | 100 | 100 | 90 | — | — | 95 | 100 | 96 | 93 | 90 | 86 | 89 | — | 100 | 100 | 87 | — | — | 97 | 98 | 95 | 95 | 85 | 68 | 68 |
| Wärmeinh. i | kcal/kg | 3,8 | 3,8 | 9,0 | — | — | 12,2 | 10,5 | 12,1 | 8,0 | 9,8 | 9,5 | 9,4 | 9,6 | 3,7 | 3,7 | 9,4 | — | — | 7,8 | 5,0 | 6,2 | 8,6 | 11,0 | 9,5 | 0,6 |
| Wassergeh. x | g/kg | 5,0 | 5,0 | 9,3 | — | — | 13,0 | 11,3 | 12,8 | 8,5 | 10,2 | 9,6 | 9,7 | 9,8 | 4,9 | 4,9 | 9,6 | — | — | 8,3 | 5,9 | 6,8 | 9,1 | 11,2 | 8,8 | 8,9 |

| Meßpunkt | | $M_{hik}$ | I | II | b | b′ | c | d | e | f | g | h | i | k | $M_{hik}$ | I | II | b | b′ | c | d | e | f | g | h | i |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Zeit | Uhr | 8 | 10 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 14 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| w | m/s | — | 0,9 | 0,9 | — | — | — | 0,8 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | [1,5] | [2,0] | [2,0] | — | 1,0 | 0,6 | — | — | — | 0,9 | 0,7 | 0,4 | 0,0 | [1,5] | [1,5] |
| t | $^{0}$C | 17,7 | 3,1 | 3,1 | 16,6 | 17,6 | 17,6 | 9,0 | 6,1 | 9,2 | 12,7 | 19,2 | 20,4 | 20,8 | 20,1 | 3,2 | 3,2 | 21,0 | 20,8 | 21,0 | 9,6 | 5,7 | 8,4 | 15,2 | 24,5 | 24,6 |
| $\varphi$ | % | — | 100 | 100 | 70 | — | — | 87 | 100 | 96 | 91 | 61 | 48 | 51 | — | 100 | 100 | 42 | — | — | 87 | 100 | 100 | 74 | 35 | 29 |
| i | kcal/kg | 10,0 | 3,7 | 3,7 | 9,0 | — | — | 6,0 | 5,0 | 6,4 | 8,2 | 9,8 | 9,3 | 9,8 | 9,6 | 3,7 | 3,7 | 9,0 | — | — | 6,2 | 4,8 | 6,2 | 8,5 | 10,0 | 9,4 |
| x | g/kg | 9,6 | 4,9 | 4,9 | 8,5 | — | — | 6,4 | 6,0 | 7,0 | 8,5 | 8,7 | 7,5 | 8,0 | 8,1 | 4,9 | 4,9 | 6,5 | — | — | 6,5 | 5,8 | 7,0 | 8,2 | 6,9 | 5,8 |

| Meßpunkt | | k | $M_{hik}$ | I | II | b | b′ | c | d | e | f | g | h | i | k | $M_{hik}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Zeit | Uhr | 14 | | 16 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| w | m/s | [2,2] | — | 0,8 | 1,0 | — | — | — | 0,8 | 0,7 | 0,4 | 0,0 | [1,0] | [1,5] | [2,3] | — |
| t | $^{0}$C | 24,5 | 24,5 | 3,1 | 3,1 | 20,2 | 21,0 | 20,5 | 9,9 | 6,4 | 9,6 | 14,5 | 23,0 | 26,5 | 24,0 | 24,2 |
| $\varphi$ | % | 34 | — | 100 | 100 | 44 | — | — | 83 | 100 | 89 | 80 | 40 | 27 | 34 | — |
| i | kcal/kg | 10,0 | 9,8 | 3,7 | 3,7 | 9,0 | — | — | 6,2 | 5,2 | 6,3 | 8,5 | 9,9 | 10,0 | 9,7 | 9,9 |
| x | g/kg | 6,8 | 6,5 | 4,9 | 4,9 | 6,7 | — | — | 6,5 | 6,1 | 6,7 | 8,4 | 7,2 | 6,0 | 6,5 | 6,6 |

Zahlentafel 4. Messungen: Dornburg. Datum: 20./21. 9. 1952. Barometerstand: 733/732 mm Hg

| Meßpunkt | | I | II | b | b′ | c | e | f | h | $M_{efh}$ | I | II | b | b′ | c | e | f | h | $M_{efh}$ | I | II | b | b′ | c | e | f |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Zeit | Uhr | 18 | — | — | — | — | — | — | — | — | 21 | — | — | — | — | — | — | — | — | 24 | — | — | — | — | — | — |
| Luftgeschw. w | m/s | 0,0 | 0,0 | [0,4] | — | — | 0,0 | 0,0 | [0,0] | — | 0,0 | 0,0 | [0,4] | — | — | 0,0 | 0,0 | [1,0] 1) | — | 0,0 | 0,0 | [0,0] | — | — | 0,0 | 0,0 |
| Lufttemptr. t | °C | 7,2 | 7,4 | 7,5 | 7,3 | 8,0 | 7,2 | 7,0 | 6,6 | 6,9 | 6,4 | 6,6 | 6,8 | 6,0 | 6,2 | 6,4 | 6,4 | 7,0 | 6,6 | 6,4 | 6,6 | 6,6 | 6,4 | 6,2 | 6,3 | 6,0 |
| Luftfeucht. $\varphi$ | % | 90 | 84 | 81 | — | — | 90 | 90 | 97 | — | 86 | 85 | 83 | — | — | 86 | 85 | 84 | — | 86 | 85 | 83 | — | — | 87 | 89 |
| Wärmeinh. i | kcal/kg | 5,3 | 5,2 | 5,0 | — | — | 5,3 | 5,2 | 4,7 | 5,1 | 4,7 | 4,7 | 4,7 | — | — | 4,7 | 4,7 | 4,8 | 4,7 | 4,7 | 4,7 | 4,6 | — | — | 4,7 | 4,6 |
| Wassergeh. x | g/kg | 5,8 | 5,5 | 5,3 | — | — | 5,8 | 5,7 | 5,5 | 5,6 | 5,3 | 5,2 | 5,2 | — | — | 5,3 | 5,3 | 5,4 | 5,3 | 5,3 | 5,2 | 5,1 | — | — | 5,3 | 5,3 |

| Meßpunkt | | h | $M_{efh}$ | I | II | b | b′ | c | e | f | h | $M_{efh}$ | I | II | b | b′ | c | e | f | h | $M_{efh}$ | I | II | b | b′ | c |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Zeit | Uhr | 24 | — | 3 | — | — | — | — | — | — | — | — | 6 | — | — | — | — | — | — | — | — | 9 | — | — | — | — |
| w | m/s | [0,5] 2) | — | 0,0 | 0,0 | [0,4] | — | — | 0,0 | 0,0 | [1,5] | — | 0,0 | 0,0 | [0,0] | — | — | 0,0 | 0,0 | [2,0] | — | 0,0 | 0,0 | [0,0] | — | — |
| t | °C | 6,2 | 6,2 | 6,6 | 6,5 | 6,7 | 6,2 | 6,2 | 6,4 | 6,0 | 6,3 | 6,2 | 6,4 | 6,2 | 6,3 | 6,3 | 6,0 | 5,9 | 5,5 | 5,7 | 5,7 | 7,4 | 7,6 | 8,5 | 8,1 | 8,2 |
| $\varphi$ | % | 91 | — | 84 | 87 | 83 | — | — | 84 | 91 | 89 | — | 91 | 89 | 88 | — | — | 87 | 93 | 97 | — | 88 | 84 | 81 | — | — |
| i | kcal/kg | 4,8 | 4,7 | 4,8 | 4,6 | 4,7 | — | — | 4,6 | 4,8 | 4,7 | 4,7 | 4,8 | 4,7 | 4,7 | — | — | 4,4 | 4,5 | 4,7 | 4,6 | 5,3 | 5,2 | 5,5 | — | — |
| x | g/kg | 5,5 | 5,4 | 5,2 | 5,4 | 5,2 | — | — | 5,2 | 5,5 | 5,4 | 5,3 | 5,5 | 5,3 | 5,3 | — | — | 5,1 | 5,3 | 5,6 | 5,4 | 5,8 | 5,5 | 5,7 | — | — |

| Meßpunkt | | e | f | h | $M_{efh}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Zeit | Uhr | 9 | — | — | — |
| w | m/s | [0,5] | 0,0 | [2,0] | — |
| t | °C | 8,1 | 8,2 | 8,7 | 8,3 |
| $\varphi$ | % | 86 | 83 | 81 | — |
| i | kcal/kg | 5,5 | 5,5 | 5,5 | 5,5 |
| x | g/kg | 5,9 | 5,8 | 5,7 | 5,7 |

1) von Westen

2) von Osten

## Zahlentafel 5.

Messungen: Dornburg. Datum: $\frac{15.2.1953.}{7.6.1953}$ Barometerstand: $\frac{750}{730}$ mm Hg

| Meßpunkt | | I | II | b | b′ | [e] | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Zeit | | 12 Uhr 15. 2. 53 | | | | | |
| Luftgeschw. w | m/s | 0,8 | 0,3 | — | — | 0,6 | Richtung in den Berg hinein |
| Lufttemperatur t | °C | —2,0 | —2,0 | —2,0 | —2,0 | —2,1 | |
| Luftfeuchtigkeit φ | % | 79 | 79 | 76 | — | 77 | |
| Wärmeinhalt i | kcal/kg | 1,0 | 1,0 | 1,0 | — | 0,9 | |
| Wassergehalt x | g/kg | 2,5 | 2,5 | 2,4 | — | 2,4 | |

| Meßpunkt | | I | II | b | b′ | c | e | f | k |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Zeit | | 12 Uhr 7. 6. 53 | | | | | | | |
| w | m/s | 1,3 | 1,3 | — | — | — | 0,4 | 0,3 | [1,0] |
| t | °C | 1,1 | 4,3 | 18,0 | 20,0 | 19,0 | 4,9 | 8,5 | 22,6 |
| φ | % | 100 | 81 | 56 | — | — | 89 | 84 | 41 |
| i | kcal/kg | 2,7 | 3,6 | 8,8 | — | — | 4,2 | 5,6 | 9,8 |
| x | g/kg | 4,2 | 4,3 | 7,4 | — | — | 4,9 | 5,9 | 7,2 |

| Meßpunkt | | WWH | Keller | I | II | b | b′ | c | e | f | k |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Zeit | | | | 15 Uhr 7. 6. 53 | | | | | | | |
| w | m/s | 0,4 | 1,4 | 1,1 | 1,2 | [0,2] | — | — | 0,7 | 0,7 | [0,7] |
| t | °C | 14,8 | 6,0 | 2,2 | 5,0 | 18,7 | 22,0 | 22,0 | 4,6 | 8,7 | 23,0 |
| φ | % | 65 | 100 | 100 | 93 | 73 | — | — | 88 | 84 | 46 |
| i | kcal/kg | 7,7 | 5,0 | 3,3 | 4,2 | 10,6 | — | — | 3,9 | 5,4 | 10,5 |
| x | g/kg | 6,9 | 6,0 | 4,6 | 5,2 | 10,1 | — | — | 4,7 | 5,6 | 8,2 |